



INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG

Langzeitwärmespeicher aus Spannbeton – Untersuchung der Betoneigenschaften bei hoher Temperatur und Feuchte

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. H. Budelmann

Juli 1984

**Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des
Landes Niedersachsen**

PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BRAUNSCHWEIG

LANGZEITWÄRMESPEICHER AUS SPANNBETON -

Untersuchung der Betoneigenschaften
bei hoher Temperatur und Feuchte

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Bathovenstr. 12
D-3300 Braunschweig

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. H. Budelmann

Juli 1984

Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln
des Landes Niedersachsen

Erlaß 2091 - BVe - 34/80 vom 13.3.1981

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung und Ziel
2. Experimentelle Simulierung der Klimabedingungen
 - 2.1 Klimabedingungen in Bauteilen
 - 2.2 Temperatur- und Feuchtebedingungen im Versuch
3. Versuchsprogramm
 - 3.1 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten
 - 3.2 Kriechen
 - 3.3 Wärmedehnungsverhalten
4. Versuchskörper
 - 4.1 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten
 - 4.2 Kriechen
5. Baustoffe
6. Versuchstechnik
 - 6.1 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten
 - 6.2 Kriechen
7. Versuchsergebnisse
 - 7.1 Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit
 - 7.2 Kurzzeitverformungsverhalten
 - 7.3 Wärmedehnungsverhalten
 - 7.4 Kriechen
8. Zusammenfassung
9. Literatur

1. Problemstellung und Ziel

Die in Kraftwerken und Industrieanlagen anfallende Niedertemperaturwärme wird in Ballungsgebieten zur Fernwärmeversorgung genutzt. Allerdings ist diese Nutzung bislang auf die Wintermonate beschränkt. Es liegt daher nahe, nach einer Speichermöglichkeit zu suchen. Eine Speicherung ist in Warmwasserbecken als Langzeitwärmespeicher möglich. In Wolfsburg wird derzeit der Prototyp eines solchen Speichers als Erdbecken mit Spannbetondeckel geplant, der eine Zweitnutzung als Parkplatz o. ä. zulässt [1]. Abb. 1 zeigt schematisch einen Querschnitt durch den geplanten Prototyp. Dies scheint nach heutigen Überlegungen die wirtschaftlichste und überdies in Ballungsräumen einzig mögliche Bauweise zu sein. Die Beladung eines Wärmespeichers zur Abdeckung jahreszeitlicher Energiebedarfsspitzen beginnt in den Sommermonaten stufenweise und endet im Oktober mit einer Speichertemperatur von ca. 95 °C. Die Entladung erfolgt nach evtl. mehrmonatiger Standzeit in den Spätwintermonaten.

Die Baustoffe des Speicherbeckens, hier wird nur der Beton der Tragkonstruktion der Abdeckung betrachtet, sind somit extremen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Dies sind veränderliche Temperaturen zwischen ca. 20 °C und 95 °C, die entweder unter Wasser einwirken oder oberhalb des Wasserspiegels in Luft mit hoher relativer Feuchte bis hin zur Dampfsättigung.

Die Bemessungs- und Konstruktionsvorschriften für Stahlbeton- und Spannbetonbauwerke (DIN 1045, DIN 4227) berücksichtigen nur übliche atmosphärische Klimaverhältnisse. Diesen Normen ist eine mittlere Temperatur von ca. 20 °C und nach anfänglicher, ca. 7tägiger Feuchtlagerung eine mittlere relative Feuchte von etwa 65 % zugrunde gelegt. Abb. 2 stellt schematisch die klimatischen Bedingungen in einem Langzeitwärmespeicher dem Normklima gegenüber.

Systematische Untersuchungen über die Veränderungen des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von Beton, der den genannten Klimabeanspruchungen ausgesetzt ist, sind nicht bekannt. Erkenntnisse aus der Reaktorforschung sind nur bedingt übertragbar, weil Reaktordruckbehälter "massige" Bauteile darstellen, die zum einen im wesentlichen stationärer Temperaturbeanspruchung unterliegen und zum anderen aufgrund langer Diffusionswege im Inneren näherungsweise ohne Feuchtaufnahme oder -abgabe "eigenfeucht" bleiben. Die vergleichsweise "feingliedrigen" Bauteile in Wärmespeichern können hingegen Temperatur- und Feuchteänderungen rascher folgen.

Es ist das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit, die Auswirkungen der Klimabeanspruchung im Wärmespeicher auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton in Abhängigkeit betontechnologischer und lagerungsbedingter Parameter zu untersuchen. Das Betonkriechen ist dabei für Spannbetonkonstruktionen von besonderer Bedeutung. Damit soll eine Grundlage für die Bemessung von Langzeitwärmespeichern geschaffen werden.

2. Experimentelle Simulierung der Klimabedingungen

2.1 Klimabedingungen in Bauteilen

Für die Auswirkungen erhöhter Temperatur im zu untersuchenden Bereich auf das Betonfestigkeits- und Verformungsverhalten ist die Betonfeuchte von großer Bedeutung. Die Feuchtebedingungen in Betonbauteilen werden wesentlich geprägt durch die Lagerung der Bauteile vor und während Temperatureinwirkungen sowie durch die Position betrachteter Bereiche im Bauteilquerschnitt bzw. durch die Bauteilabmessungen.

Während der Zeit vor Inbetriebnahme des Wärmespeichers, also vor erstmaliger Temperaturbeanspruchung, im folgenden Vorlagerungszeit genannt, werden Randbereiche von Bauteilen stärker austrocknen als Innenbereiche. Näherungsweise wird angenommen, daß Randbereiche während der Vorlagerung bis zum hygrischen Gleichgewicht mit der Umgebungsluft austrocknen können, während Innenbereiche kein Wasser abgeben, sondern die aus der Betonmischung resultierende Feuchte, im allgemeinen Sättigungsfeuchte, behalten. Diese Annahme ist berechtigt, da bekannt ist, daß Beton etwa 10 cm unter einer bei 20 °C trocknenden Betonoberfläche in Abhängigkeit von Umgebungsfeuchte und Kapillarporosität des Zementsteins nach einem Jahr noch ca. 85 ÷ 95 % seines Ausgangswassergehalts aufweist [2].

Während des Betriebs, der erhöhte Temperatur bis ca. 95 °C bei unterschiedlicher Umgebungsfeuchte bis zur Sättigungsfeuchte verursacht, stellen sich in Bauteilen folgende Verhältnisse ein: Anders als im Inneren vergleichsweise dickwandiger Bauteile von Reaktordruckbehältern, wo näherungsweise stationäre Temperatur- und Feuchteverhältnisse herrschen, sind Temperatur- und Feuchteänderungen im Inneren der

viel dünneren Wärmespeicherbauteile nicht unterbunden, sondern finden lediglich gegenüber randnahen Bereichen verzögert statt. Dabei erfolgt Feuchtetransport langsamer als Wärmetransport. Es ist somit denkbar, daß im Innenbereich eines Bauteils temporäre Druckerhöhung im Porensystem des Betons gegenüber atmosphärischen Verhältnissen entsteht.

Die vorgenommene Unterscheidung in Rand- und Innenbereiche eines Bauteils kann natürlich die wirklichen Verhältnisse nur stark vereinfachend erfassen. Tatsächlich liegt ja ein weites, kontinuierliches Feld klimatischer Kombinationen bzw. Beanspruchungen vor. Durch die einfache Bereichsunterscheidung, die vernünftigerweise nicht weiter quantifiziert und lokalisiert werden sollte, sollen die komplexen Beanspruchungen dem Experiment zugänglich gemacht werden. Zudem soll eine Beschränkung auf die Extremwerte der Beanspruchung erfolgen. Abb. 3 stellt die getroffenen Unterscheidungen zusammenfassend dar.

2.2 Temperatur- und Feuchtebedingungen im Versuch

Die Temperatur- und Feuchtebedingungen im Versuch waren so zu wählen, daß sie für die in Abschnitt 2.1 getroffene Bereichsunterscheidung repräsentativ sind.

So wurde für die Vorlagerung bis Betriebsbeginn unterschieden:

1. für Innenbereiche

- Lagerung unter Wasser

Kurzbezeichnung

20 °C/ 



2. für Randbereiche

- nach anfänglicher Feuchtelagerung
Weiterlagerung bei 20 °C/65 % r.F.

20 °C/65 % r.F.

- | | |
|-------------------------------------|-----------------|
| - nach anfänglicher Feuchtelagerung | Kurzbezeichnung |
| Weiterlagerung bei 20 °C/95 % r.F. | 20 °C/95 % r.F. |

Im Anschluß an die Vorlagerung, also für Betriebsbedingungen, wurde unterschieden:

- | | |
|---|--|
| - Lagerung unter Wasser
bei 95 °C | <u>Kurzbezeichnung</u>
95 °C/  |
| - Lagerung in gesättigtem Dampf
bei 95 °C und 0,86 bar Über-
druck (Drucktopf) | 95 °C/  |
| - Lagerung bei 95 °C und "freier"
Austrocknung (ohne Feuchteregelung
der Umgebungsluft) | 95 °C/0 |
| - Lagerung bei 95 °C und
65 % r.F. | 95 °C/65 % r.F. |
| - Lagerung bei 95 °C und
95 % r.F. | 95 °C/95 % r.F. |

Die untersuchten Klimakombinationen für die Vorlagerungs- und Betriebsbedingungen werden im Versuchsprogramm in Abschnitt 3 erläutert.

3. Versuchsprogramm

3.1 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten

Der Einfluß klimatischer Beanspruchung wurde für die folgenden Materialkennwerte und -beziehungen untersucht:

- Zylinderdruckfestigkeit β_C
- Spaltzugfestigkeit β_{SZ}
- Elastizitätsmodul (Druck) E
- Spannungs-Dehnungsverhalten σ/ϵ

Bevor Probekörper erhöhter Temperatur ausgesetzt werden, erhärteten sie unter definierten Bedingungen, die in Abschnitt 2.2 als Vorlagerungsarten bezeichnet und erläutert wurden. Als Vorlagerungsdauern wurden 40 Tage und ca. 150 Tage gewählt, um den Einfluß unterschiedlicher Betonalter beim Einsetzen von Klimabeanspruchungen zu ermitteln. Die anschließende Einwirkungsdauer erhöhter Temperatur betrug zwischen 40 und 120 Tagen. Die Klimaeinwirkung erfolgte einerseits stationär, also bei zeitlich konstanten Werten, und in anderen Serien auch zyklisch, d. h. als Wechselfolgen zwischen Zeitabschnitten erhöhter Temperatur und Normaltemperatur.

Zu Vergleichszwecken wurde in einigen Serien die klimatische Vorlagerungsbedingung bis zum Prüfzeitpunkt weitergeführt.

Die Ermittlung der Kennwerte erfolgte im abgekühlten Zustand, ca. 24 Stunden nach Beendigung der Temperaturbeanspruchung. Während des Abkühlens befanden sich die Proben zur Feuchtekonservierung in Folie. Zum Vergleich wurden in einigen Serien auch die Druck- und Spaltzugfestigkeit im heißen Zustand ermittelt.

Die Tabellen 1a und 1b zeigen die untersuchten Kombinationen von Vorlagerungs- und Betriebsbedingungen sowie die Dauer der jeweiligen Klimabeanspruchung für den Fall stationärer Einwirkung. Außerdem wird gezeigt, welche Kennwerte ermittelt wurden, welche Anzahl Probekörper jeweils zur Verfügung stand und in welchem Temperaturzustand (warm oder kalt) die Ermittlung der Kennwerte erfolgte. Die Tabellen 2a und 2b geben die entsprechenden Informationen für zyklische Klimaeinwirkung. Tabelle 3 enthält die Serien, in denen zu Vergleichszwecken das Vorlagerungsklima bis zum jeweiligen Prüfungstermin fortgeführt wurde.

Die Ermittlung der Kennwerte fand für jene Serien bei stationärer Klimaeinwirkung, die im Betonalter 40 d begannen und 40 d dauerten, nur zu Beginn und am Ende der Klimaeinlagerung statt. Begann die Klimaeinwirkung erst im Betonalter 150 d, fanden die Prüfungen nach 40, 80 und 120 d Klimaeinwirkung oder nach 30, 60, 90 und 120 d statt. Im Falle zyklischer Klimaeinsetzung wurden ebenfalls Zwischenprüfungen durchgeführt.

Der Mindeststichprobenumfang bei der Ermittlung der Festigkeitswerte war 3; maximal wurden 5 Proben geprüft. Bei der Messung der σ/ϵ -Linien und des E-Moduls als Sekantenmodul wurden jeweils 1 oder 2 Proben geprüft.

3.2 Kriechen

Beton zeigt unter dauernd einwirkender Last zeitabhängige Verformungen, er kriecht. In der vorliegenden Untersuchung war die Entwicklung der Kriechverformungen unter Druckbeanspruchung bei gleichzeitiger Einwirkung der klimatischen Betriebsbedingungen in Langzeitwärmespeichern zu ermitteln. Diese Betriebsbedingungen charakterisierende Versuchsklimata wurden in Abschnitt 2.2 definiert.

Kriechversuche an "frei" austrocknenden sowie versiegelt gelagerten Proben wurden bereits im Rahmen der Reaktorforschung zahlreich durchgeführt. Den bekanntlich hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand von Kriechversuchen berücksichtigend, beschränkten sich die Versuche in diesem Forschungsvorhaben daher auf das Kriechen von Beton unter Wasser sowie in Luft unterschiedlicher Feuchte bei erhöhter Temperatur. Variiert wurde außerdem der Belastungszeitpunkt (vor bzw. nach der Aufheizung). Weiterhin wurde der Einfluß zyklischer Temperaturänderungen auf das Kriechen untersucht.

Alle Kriechprobekörper waren zum Zeitpunkt erstmaliger Temperaturbeaufschlagung bzw. Belastung mindestens 150 Tage alt. Die Vorlagerungsbedingungen (Reifezeit) entsprachen jenen für die Untersuchung des Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhaltens. Die Belastungshöhe betrug in allen Versuchen etwa $\frac{1}{3}$ der Zylinderdruckfestigkeit zum Belastungszeitpunkt. Die Belastungsdauer betrug 40 Tage. Im Anschluß an die Entlastung erfolgte in der Regel eine Beobachtung der sog. verzögert-elastischen Rückverformung bei entweder weiterhin erhöhter Temperatur oder nach Abkühlung auf 20 °C.

Beton, der während des Kriechens nicht versiegelt ist oder nicht unter Wasser lagert, erfährt zusätzlich zu den Kriechverformungen lastunabhängige und zeitabhängige Verformungen durch Trocknung, er schwindet. Diese Schwindverformungen sowie die thermischen Verformungen bei Aufheiz- oder Abkühlvorgängen wurden an lastfrei klimatisierten Proben aufgezeichnet. Die Trocknung des Betons in Abhängigkeit der Zeit wurde an miteingelagerten Probekörperabschnitten gemessen. Näheres hierzu wird in Abschnitt 4.2 erläutert.


Tabelle 4 gibt einen Überblick über die durchgeführten Kriechversuche. Dargestellt sind die Lagerung bei der Reifung (Vorlagerung), die anschließende klimatische Beanspruchung im eigentlichen Kriechversuch, der Belastungszeitpunkt, das Klima bei der Beobachtung der verzögert-elastischen Rückverformung sowie die Beobachtungszeiträume der einzelnen Versuchsphasen.

In jedem Kriechversuch wurden zwei belastete Proben und eine unbelastete Probe beobachtet (Schwindkörper). Zu Vergleichszwecken fanden auch Kriechversuche bei 20 °C unter Fortführung des Vorlagerungsklimas statt.

3.3 Wärmedehnungsverhalten

Das Wärmedehnungsverhalten der verwendeten Betone wurde zum einen an den für das Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten gewählten Probekörpern (s. Abschnitt 4) bestimmt und zum anderen im Zusammenhang mit den Kriechversuchen ermittelt.

Im ersten Fall wurden Proben im Alter von 80 d nach folgenden Vorlagerungen mit $\dot{T} = 2 \text{ K/min}$ auf 95 °C aufgeheizt, wobei sie nicht vor Austrocknung geschützt waren:

- 80 d 20 °C/65 % r.F.
- 80 d 20 °C/ 
- 70 d 20 °C/65 % r.F. und dann Trocknung
bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz;
anschließend versiegelt abgekühlt auf 20 °C.

Nach einer Haltezeit bei 95 °C von 2 Stunden erfolgte die Abkühlung auf 20 °C mit $\dot{T} = 2 \text{ K/min}$.

Im Zusammenhang mit den Kriechversuchen wurde die thermische Dehnung an den Schwindkörpern beim Aufheizvorgang mit $\dot{T} = 5 \text{ K/h}$ bei Versuchsbeginn gemessen und bei Versuchsende während der Abkühlung.

4. Versuchskörper

4.1 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten

Für die Untersuchung des Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhaltens wurden Betonzyylinder $d = 8$ cm verwendet. In den Serien F1 - F16, FV1 - FV4 und F1,Z - F16,Z wurden Bohrkerne benutzt, die aus Betonplatten mit den Abmessungen 130 x 130 x 30 cm gebohrt wurden. Aus jedem 30 cm hohen Kern wurden entsprechend Abb. 4 je ein Zylinder $h = 16$ cm für die Prüfung von Druckfestigkeit, E-Modul, σ - ϵ -Linie und Wärmedehnverhalten und ein Zylinder $h = 8$ cm für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit hergestellt.

Die Bohrkerne wurden nach dem Ausschalen der Platten im Betonalter $t = 2d$ gezogen und bis zum Alter $t = 7d$ unter Wasser gelagert. Dann wurden sie in die Abschnitte zerlegt und beim jeweiligen sog. Vorlagerungsklima nach Abschnitt 2.2 bis zum Versuchsbeginn weitergelagert.

Da aufgrund von Unebenheiten der Mantelfläche der Bohrkerne die Herstellung paralleler und normal zur Zylinderachse verlaufender Stirnflächen schwierig war, wurden die später betonierten Probekörper der Serien F17, F18, F17,Z und F18,Z in Zylinderschalungen aus Stahl ($d = 8$ cm, $h = 30$ cm) hergestellt und entsprechend zerteilt.

Die Verdichtung der Betonplatten erfolgte mit Innenrüttlern bis augenscheinlich keine Luftblasen mehr aufstiegen. Die in Stahlzylinderschalungen betonierten Probekörper wurden in zwei Lagen mit 30 sek. Verdichtungszeit nach der 1. Lage und abschließend 60 sek. Verdichtungszeit auf dem Rütteltisch hergestellt.

4.2 Kriechen

Für die Kriechversuche wurden Betonhohlzylinder ($d_i = 5 \text{ cm}$, $d_a = 15 \text{ cm}$, $h = 60 \text{ cm}$) verwendet. Hohlzylinder boten für dieses Vorhaben prüftechnische Vorteile, über die in Abschnitt 6 berichtet wird. Die Wanddicke ist mit 5 cm gering genug, um der Zielrichtung des Vorhabens entsprechend instationäre Temperatur- und Feuchtezustände innerhalb ausreichend kurzer Versuchsdauern zu untersuchen. Dabei gestattet diese Wanddicke die Verwendung von Zuschlägen mit 16 mm Größtkorndurchmesser, also für Konstruktionsbetone üblicher Sieblinien. Die Höhe von 60 cm ermöglicht Verformungsmessungen auf einer ausreichend langen Meßbasis von 30 cm, ohne in querdehnungsbehinderte Krafteinleitungsbereiche zu gelangen.

Als Schalung für die Hohlzylinder dienten ein inneres und ein äußeres PP-Rohr, die durch eine Fuß- und Kopfplatte mit 4 außenliegenden Stahlstangen fixiert wurden. Eine derartige Schalung ist in Abb. 5 dargestellt.

Die Versuchskörper wurden in 3 Lagen stehend betoniert. Nach der 1. und 2. Lage wurde auf dem Rütteltisch je 30 sek. verdichtet und nach der 3. Lage abschließend 60 sek. Nach der Herstellung blieben die Zylinder 90d bei 20 °C in den PP-Schalungen. Die Stirnflächen wurden mit Folie enganliegend versiegelt. Nach 90d wurden die Stirnflächen entsiegelt und plangeschliffen. Um die Wasseraufnahme beim Schleifen gering zu halten, wurden die Zylinder erst anschließend durch Auftrennen des äußeren Rohres ausgeschalt. Im Anschluß erfolgte die Vorlagerung gemäß Versuchsprogramm bis zum Alter von 150d bei 20 °C und 65 bzw. 95 % r.F..

Das innere Kunststoffrohr blieb während der gesamten Versuchsdauer als verlorene Schalung im Körper. Feuchteaufnahme bzw. -abgabe konnten also nur über die äußere Mantelfläche stattfinden.

Die Beteiligung des inneren PP-Rohres an der Kraftaufnahme ist vernachlässigbar gering, wie die nachfolgende Betrachtung zeigt:

$$\begin{aligned} E_b &\approx 30.000 \text{ N/mm}^2 & E_{pp} &\approx 1.400 \text{ N/mm}^2 \\ A_b &= (150^2 - 50^2) \cdot \pi \cdot 0,25 & A_{pp} &= (50^2 - 41^2) \cdot \pi \cdot 0,25 \\ &= 15,71 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 & &= 0,64 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\ \sigma_K &\approx 15 \text{ N/mm}^2 \\ \varepsilon_b &= 15/30.000 = 0,5 \text{ ‰} \Rightarrow & \sigma_{pp} &= \frac{0,5}{1000} \cdot 1.400 = 0,7 \text{ N/mm}^2 \\ F_b &= 15 \cdot 15,71 \cdot 10^3 = 235,6 \text{ kN} & F_{pp} &= 0,7 \cdot 0,64 \cdot 10^3 = 0,45 \text{ kN} \\ &= \text{Prüfkraft} \end{aligned}$$

$$F_{pp} = 0,19 \text{ ‰ von } F_b$$

Somit entspricht der Anteil des PP-Rohres an der Kraftaufnahme des Betons unter der Voraussetzung linear-elastischen Werkstoffverhaltens nur etwa 0,2 ‰, mit abnehmender Tendenz bei erhöhter Temperatur wegen der E-Modulverringerung des Kunststoffs.

Zur Erfassung des zeitlichen Trocknungsverlaufs der Kriechkörper während des Versuchs wurden Hohlzylinder in ca. 5 cm dicke Scheiben geschnitten und, wie Abb. 6 zeigt, mit einer zentralen Zugstange in derselben Lage wieder zusammengespannt. Zwischen die einzelnen Scheiben wurden ca. 2 mm dicke Folien gelegt, so daß ein Feuchteaustausch der Scheiben untereinander und die Trocknung an den Schnittflächen zuverlässig unterbunden waren. Diese Scheibenpakete wurden lastfrei mitklimatisiert. Durch Wägung von Scheiben und anschließende Trocknung bei 105 °C konnte die mittlere Betonfeuchte U_m im Verlauf der Kriechversuche wie folgt ermittelt werden:

$$U_m = \frac{G_f - G_t}{G_t} \cdot 100 \text{ [M.-\%]}$$

mit G_f = Gewicht der Scheibe im feuchten Zustand

G_t = Gewicht der Scheibe nach Trocknung bei 105 °C

Die Kriechversuche an unter Wasser gelagertem Beton (Serien K1 und KV1) wurden an Bohrkernen ($d = 8 \text{ cm}$, $d = 16 \text{ cm}$) durchgeführt, weil hierfür zur Verfügung stehende Kriechversuchsstände den Einbau der großen Hohlzylinder nicht zuließen.

5. Baustoffe

Es wurden zwei Betonsorten mit unterschiedlicher Zuschlagart, nämlich Quarzkies und Kalkstein, aber ansonsten unveränderter Zusammensetzung untersucht.

Die Sollwerte der Betonzusammensetzung sind:

Zement	:	PZ 35 F
Zuschlag	:	a) Quarzkies, Größtkorn 16 mm b) Kalkstein, Größtkorn 16 mm mit einer Sieblinie zwischen A und B16 nach DIN 1045
Zusammensetzung:		Z = 350 kg/m ³ G = 1840 kg/m ³ W = 189 l/m ³ Mischungsverhältnis: 1 : 5,3 : 0,54 GT

Der Quarzkieszuschlag stammte aus Vienenburg/Harz und der Kalksteinzuschlag aus der Grube Rostorf bei Göttingen. Der Quarzkieszuschlag bestand zu etwa 80 % aus Quarzit und Sandstein sowie zu etwa je 10 % aus Granit und Kiesel- bzw. Tonschiefer. Der Kalkgehalt des Zuschlags aus Rostorf betrug zwischen 85 und 90 %.

In allen Betonagen wurde Portlandzement 35 F derselben Herstellungscharge der Fa. Nordcement, Hannover, mit einer spezifischen Oberfläche nach Blaine von 3200 cm²/g verwendet. Die Istwerte der Betonzusammensetzung sowie die Frischbeton- daten für die einzelnen Betonagen der Versuchsserien sind in Tabelle 5 zusammengestellt. In Abb. 7 sind die Bereiche der Regelsieblinien angegeben, innerhalb derer alle verwendeten Sieblinien für Quarzkies- bzw. Kalksteinzuschlag lagen. Tabelle 6 enthält die Würfeldruckfestigkeiten, gemessen an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte der Messungen an 3 Würfeln.

6. Versuchstechnik

6.1 Festigkeits- und Kurzzeitverformungsverhalten


Bei der Erzeugung der zu simulierenden Klimabedingungen wurden im Institut vorhandene Geräte verwendet, die den Erfordernissen dieses Vorhabens angepaßt wurden. Zur Klimaerzeugung im einzelnen:

95 °C/ 

Es wurden wärmeisolierte Edelstahlbehälter mit 3-kW-Heizelementen und Thermostaten verwendet. Die Behälter erhielten Abdeckungen aus Kupferblech mit aufgelöteten Kupferrohrschlangen, durch die Leitungswasser transportiert wurde. An diesen gekühlten Decken konnte der in großer Menge entstehende Wasserdampf kondensieren und in die Behälter zurücktropfen. Auf diese Weise wurden die Wasserverluste gering gehalten und die Wasserdampfbelastung der Umgebung begrenzt.

95 °C/O

Austrocknende Proben wurden in Trockenschränke eingelagert.

95 °C/ 

Die Lagerung bei 95 °C in gesättigtem Wasserdampf wurde in Drucktöpfen (s. Abb. 8) durchgeführt, die jeweils ca. 1,5 l Wasser enthielten. Die Drucktöpfe wurden in Trockenschränke eingelagert.

95 °C/65 % r.F.

Die Lagerung erfolgte in einer Klimakammer, deren Funktionsprinzip identisch mit dem

95 °C/95 % r.F.

der für die Kriechversuchsstände verwendeten Klimakammer ist, die in Abschnitt 6.2 beschrieben wird.

20 °C/95 % r.F. Erhöhte Luftfeuchtigkeit bei Normaltemperatur wurde in geschlossenen Behältern über gesättigter Salzlösung erzeugt (für 95 % r.F. KNO_3 -Lösung).

Die Verformungsmessungen bei der Erstellung von Spannungs-Dehnungslinien wurden mit Dehnungstreifen (DMS) vorgenommen. Je Probekörper wurden 3 DMS auf den Umfang verteilt, und die mittlere Dehnung wurde aufgezeichnet.

6.2 Kriechen

Für Kriechversuche an wassergelagertem Beton bei 20 °C und 95 °C wurden im Institut vorhandene Kriechversuchsstände umgerüstet. Es wurden zylindrische Cr-Ni-Stahlbehälter ($d = 15 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$) hergestellt, durch deren Deckel und Böden plangedrehte Cr-Ni-Stahlzylinder ($d = 8 \text{ cm}$) geführt wurden. Zwischen die Stahlzylinder wurden die Probekörper gestellt. In Abb. 9 sind diese Kriechstände schematisch dargestellt.

Die Versorgung der Versuchsstände mit 95 °C heißem Wasser erfolgte von einem externen Badthermostat. Das dort erhitzte Wasser wurde von einer Saug-Druckpumpe den Behältern zugeführt und oben, im Bereich der oberen Stahlzylinder, wieder in den Thermostat gesaugt. Da die Saugleistung der Pumpe höher als die Druckleistung ausgelegt war, konnte ein konstanter Wasserspiegel in Höhe des Saugrohres gehalten werden.

Die Kriechlast von ca. $1/3$ der Zylinderdruckfestigkeit wurde hydraulisch über untenbefindliche Kolben aufgebracht und anschließend pneumatisch, mittels Preßluftflasche und Membrandruckspeicher, konstant gehalten.

Die Verformungen jeder Probe wurden an 4 Stellen mit einem Setzdehnungsmesser (Meßbasis 100 mm) zwischen Ober- und Unterhaupt des Versuchsstandes über angeklebte Winkel gemessen.

Kriechversuche bei erhöhter Temperatur in Luft unterschiedlicher relativer Feuchtigkeit wurden an den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Hohlzylindern 15 cm x 60 cm in Versuchsständen durchgeführt, die im Rahmen des Lotto-Forschungsvorhabens "Prüftechnologie des Betonkriechens bei erhöhter Temperatur und veränderlicher Feuchte im instationären Zustand" entwickelt wurden. Über dieses, ebenfalls mit Hilfe von Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen finanzierte Vorhaben wird in /3/ berichtet. Daher ist hier nur eine Kurzbeschreibung der Kriechversuchstechnik erforderlich:

In Boden und Decke des Prüfraumes befinden sich hintereinander je zwei Durchführungen ($d = 150$ mm) für Druckstempel zur Belastung. Zur Temperierung sowie zur Be- und Entfeuchtung des Prüfraums dient ein separates Klimatisierungsaggregat, das durch isolierte Leitungen mit dem Prüfraum verbunden war. Abb. 10 zeigt das Funktionsprinzip dieses Aggregats.

Die Temperierung des Prüfraums erfolgt durch Sole, die im Klimaaggregat temperiert und durch einen Wärmetauscher im Prüfraum geleitet wird. Beliebige relative Luftfeuchtigkeiten im Prüfraum können mittels eines Wasserbades eingestellt werden, das auf die Taupunkttemperatur der bei Prüftemperatur gewünschten relativen Luftfeuchtigkeit temperiert wird. Durch dieses Taupunktbad perlt Luft, die dort wassergesättigt wird und anschließend in den Prüfraum gelangt. Dort wird sie aufgeheizt, wodurch sich die gewünschte Feuchtigkeit einstellt. Mittels eines digitalen Zeitprogrammgebers können beliebige Temperatur-Feuchte-Programme vorgegeben werden.

Abb. 11 zeigt einen Vertikalschnitt durch den Kriechversuchsstand. Die über Druckstempel in den Probekörper eingeleitete Druckkraft wird durch eine zentrale Zugstange aufgenommen. Die Belastung erfolgt durch einen hydraulischen Hohlkolbenzylinder, die Lastkonstanthaltung durch Tellerfedern. Mittels einer Ringkraftmeßdose sowie mit Hilfe von Meßuhren an den Tellerfedern werden die Kraft und der Federweg kontrolliert und können gegebenenfalls korrigiert werden. Alle Stahlteile im Prüfraum bestehen aus Cr-Ni-Stahl, die übrigen aus Baustahl St 37.

Verformungen werden im Prüfraum am Probekörper mit speziell vor Feuchtigkeit geschützten induktiven Wegaufnehmern gemessen. Die Wegaufnehmer, je drei auf den Umfang verteilt, werden auf Meßblöcke montiert, die eine gehärtete Schneide aufweisen und von umlaufenden Aluminium-Spannrings an den Probekörper gepreßt werden. Zur Überbrückung der Meßbasis von 300 mm dienen Stäbe aus Invarstahl. Abb. 12 zeigt schematisch einen Längsschnitt durch das Meßsystem. In Abb. 13 ist ein Spannrings mit Meßblöcken abgebildet und in Abb. 14 ein Probekörper im Prüfraum mit montiertem Meßsystem.

Die Kriechversuche bei 20 °C und erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit von ca. 95 % fanden in separaten Versuchsständen statt, die prinzipiell wie die oben beschriebenen aufgebaut sind. Abb. 15 zeigt einen solchen Kriechversuchsstand, in dem ein Behälter mit gesättigter KNO_3 -Lösung seitlich an den Probekörper angesetzt wurde. Abb. 16 verdeutlicht in einem Vertikalschnitt den Aufbau des Behälters. Die Verformungsmessungen wurden mit Setzdehnungsmessern (Meßbasis 300 mm) durchgeführt, wozu die Behälter jeweils kurzzeitig entfernt wurden.

7. Versuchsergebnisse

7.1 Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit

Die Ergebnisse der Ermittlung von Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit nach Klimabeanspruchung sind in den Tabellen 7a bis 7c für stationäre Klimaeinwirkung und in den Tabellen 8a bis 8c für zyklische Einwirkung zusammengefaßt. Die Tabellen enthalten die Mittelwerte der Zylinderdruckfestigkeit \bar{B}_C und der Spaltzugfestigkeit \bar{B}_{SZ} für Quarzkies- und Kalksteinbeton jeweils in [N/mm²]. Die zugehörigen Standardabweichungen s der Stichproben wurden ebenfalls in [N/mm²] angegeben.

Um zu erfassen, in welchem Maße Klimaeinwirkungen Festigkeitsänderungen bewirken, wurden die mittleren Festigkeiten nach Klimaeinwirkung auf jene mittleren Festigkeiten bezogen, die sich nach Weiterlagerung bis zum Prüfzeitpunkt bei Normal-
klima 20 °C/65 % r.F.ergaben. Diese Werte der

bezogenen, mittleren
Zylinderdruckfestigkeit $\bar{B}'_C = \frac{\bar{B}_C(95\text{ °C/}\varphi)}{\bar{B}_C(20\text{ °C/65 \% r.F.)}}$
und

bezogenen, mittleren
Spaltzugfestigkeit $\bar{B}'_{SZ} = \frac{\bar{B}_{SZ}(95\text{ °C/}\varphi)}{\bar{B}_{SZ}(20\text{ °C/65 \% r.F.)}}$

sind in den Tabellen 9a und 9b für stationäre Klimaeinwirkung und in den Tabellen 10a bis 10c für zyklische Klimaeinwirkung dargestellt.

Mit Hilfe des t-Tests wurde überprüft, ob ein festgestellter Effekt (Festigkeitsänderung) unter Beachtung von Probenanzahl und ermittelter Standardabweichung statistisch signifikant ist. Als Irrtumswahrscheinlichkeit für die Ergebnisse wurde $\alpha = 5\text{ \%}$ zugrundegelegt. Für die Durchführung des t-Tests wurde

der zu prüfende Effekt $\Delta\bar{\beta}'$ als Differenz zwischen der bezogenen Festigkeit 1 nach Lagerung bei 20 °C/65 % r.F. und der bezogenen Festigkeit $\bar{\beta}'$ bzw. $\bar{\beta}'_{SZ}$ gemäß obiger Definition ausgedrückt:

$$\Delta\bar{\beta}'_C = 1 - \bar{\beta}'_C \quad \text{bzw.}$$

$$\Delta\bar{\beta}'_{SZ} = 1 - \bar{\beta}'_{SZ}$$

Die Standardabweichung s jeder Stichprobe wurde auf den Mittelwert der Stichprobe bezogen:

$$s' = \frac{s}{\bar{\beta}}$$

Nun konnte mit Hilfe der graphischen Darstellung des t-Tests in Abb. 17 jeweils leicht festgestellt werden, ob eine ermittelte Festigkeitsänderung gegenüber 20 °C/65 % r.F.-Lagerung bei bekannter Probenanzahl und Standardabweichung im Rahmen der vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 5\%$ statistisch signifikant ist.

Das Ergebnis ist in den Tabellen 9a, 9b und 10a bis 10c enthalten.

Es ist erkennbar, daß Quarzkiesbeton durch die stationär einwirkende Temperatur $T = 95\text{ °C}$ bei unterschiedlichen Feuchtebedingungen Druckfestigkeitsverlust bis ca. 25 %, aber auch Festigkeitsgewinn bis etwa 10 % gegenüber Lagerung bei 20 °C/65 % r.F. erfährt. Die Festigkeitseinbußen von Kalksteinbeton liegen meist höher: um 30 bis 35 %. Wirkt das Klima zyklisch ein, stellen sich keine Festigkeitsänderungen ein, die sich deutlich von denen nach stationärer Einwirkung unterscheiden. Aufgrund der i. a. geringen Standardabweichungen ist der überwiegende Anteil der nachgewiesenen Effekte statistisch signifikant.

Die größeren Standardabweichungen bei der Messung der bekanntlich stärker streuenden Spaltzugfestigkeit führten hier zu häufig statistisch nicht signifikanten Ergebnissen. Die Änderungen der Spaltzugfestigkeiten bewegen sich im selben Bereich wie die der Druckfestigkeit; mitunter werden auch geringere Änderungen festgestellt.

An Serien, deren stationäre klimatische Beanspruchung erst im Betonalter $\tau_0 = 150$ d begann und 120 d dauerte, wurden nach 40 und 80 d bzw. 30, 60 und 90 d Zwischenprüfungen durchgeführt, um Aufschluß über den zeitlichen Ablauf von Festigkeitsänderungen zu erlangen. In Abb. 18 ist die Zylinderdruckfestigkeit von Quarzkiesbeton, bezogen auf die Festigkeit bei 20 °C/65 % r.F.-Lagerung, über der Klimaeinwirkungsdauer aufgetragen. Für den Fall der 95. °C-Lagerung unter Wasser bzw. im Drucktopf scheint der nach 40tägiger Einlagerung beobachtete Festigkeitsverlust von im Mittel etwa 20 % im Verlauf weiterer Einlagerungszeit etwa konstant zu bleiben. Hingegen zeigt bei 65 bzw. 95 % r.F. eingelagerter Quarzkiesbeton bei der ersten Zwischenprüfung nach 30 d nur 5- bis 10prozentigen Druckfestigkeitsverlust, der bei weiterer Einlagerung wieder abnimmt, wobei für 95 %/65 % r.F.-gelagerten Beton nach 120 d sogar eine Festigkeitszunahme von ca. 10 % zu verzeichnen ist.

Unter Wasser bzw. im Drucktopf gelagerter Beton trocknet im Gegensatz zu dem bei 95 % r.F. und besonders bei 65 % r.F. gelagerten nicht aus. Da die Druckfestigkeit bekanntlich mit abnehmender Betonfeuchte ansteigt, ist denkbar, daß im zweiten Fall die Trocknung thermisch bedingte Entfestigung kompensiert. Ähnliche Beobachtungen konnten auch in [4] gemacht werden.

Aus Abb. 20 ist ersichtlich, daß anscheinend auch die Änderungen der Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton nicht mit der Einlagerungsdauer zunehmen. Hingegen ist eine verlustkompensierende Wirkung der Trocknung, wie sie für die Druckfestigkeit beobachtet wurde, aus den stärker streuenden Werten für die Spaltzugfestigkeit nicht ablesbar.

Die entsprechenden Darstellungen für Kalksteinbeton zeigen die Abb. 19 und 21. Auch hier ist ein deutlicher Einfluß der Einlagerungsdauer nicht erkennbar.

Die Abb. 22 bis 25 zeigen die auf 20 °C/65 % r.F.-Lagerung bezogene Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit von Quarzkies- und Kalksteinbeton für den Fall zyklischer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl. In allen Fällen kann mit zunehmender Zyklenanzahl abnehmende Festigkeit beobachtet werden, die im Beobachtungszeitraum jedoch nicht wesentlich unter die sich nach stationärer Klimaeinwirkung einstellende Festigkeit fällt. Ob weitere Zyklen weiteren Festigkeitsverlust bewirken können und wie hoch dieser ggf. ausfällt, ist aus den vorliegenden Ergebnissen nicht zu beantworten. Beachtenswert ist, daß die bezogene Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton (Abb. 24) nach anfänglichen Zyklen für Lagerung bei 95 °C/95 % r.F. bzw. 65 % r.F. Werte größer 1 aufweist, im weiteren dann aber auch kontinuierlich abnimmt. Für diesen für die Druckfestigkeit nicht beobachteten Effekt kann keine Erklärung gegeben werden.

In Abb. 26 wurde die sich bei zyklischer Klimaeinwirkung einstellende Druckfestigkeit von Quarzkiesbeton auf diejenige Festigkeit bezogen, die man nach etwa gleich langer stationärer Einwirkung desselben Klimas erhält. Man erkennt, daß eine niedrige Zyklenanzahl eine geringere Festigkeitsänderung bewirkt als ein ent-

sprechendes stationäres Klima. Weitere Zyklen führen zu einem fortgesetzten Festigkeitsverlust, während stationäres Klima, wie obenstehend bereits festgestellt wurde, keine eindeutigen zeitabhängigen Festigkeitsänderungen bewirkt. Innerhalb des Beobachtungszeitraumes in diesem Vorhaben liegt die Druckfestigkeit zyklisch klimabeanspruchten Quarzkiesbetons um etwa 0 bis 10 % unter der stationär beanspruchten Betons. Hiervon abweichendes Verhalten zeigen Proben, die zyklisch zwischen 95 °C/65 % r.F. und 20 °C/65 % r.F. beansprucht werden. Während sich bei stationärer Einwirkung dieses Klimas mit zunehmender Betontrocknung Festigkeitszuwachs einstellt (s. Abb. 18), führen Zyklen zu Entfestigung (Abb. 22), so daß nach ca. 120 d die Druckfestigkeit nach Zyklen nur etwa 70 % derjenigen nach stationärem Klima beträgt.

Für die Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton stellt sich in Abb. 27 ein ähnliches Bild dar. Lediglich für die Serien bei 95 und 65 % r.F. liegt ein anderes Verhalten vor. Hier liegen die Festigkeitswerte nach Zyklen bis ca. 30 % über denen nach stationärem Klima. Dies liegt an der bereits genannten und nicht erklärbaren Erscheinung, daß zyklische Klimabeanspruchung anfangs Festigkeitsgewinn verursacht, anschließend aber auch kontinuierlichen Festigkeitsverlust mit sich bringt (s. Abb. 24). Im Gegensatz zu den Ergebnissen für die Druckfestigkeit nach stationärem Klima (Festigkeitsgewinn), werden für die Spaltzugfestigkeit Verluste registriert (s. Abb. 20).

Bei der bisher vorgestellten Auswertung werden die Festigkeitswerte nach Klimaeinwirkung auf diejenigen Festigkeiten bezogen, die sich nach Weiterlagerung bis zum Prüfzeitpunkt bei 20 °C/65 % r.F. einstellten. Während die Wasser- oder Drucktopflagerung bei 95 °C eine Entfeuchtung des Betons nicht zuläßt, ist jedoch bei der Vergleichslagerung 20 °C/65 % r.F. eine Trocknung

möglich. Dadurch werden neben Temperatureffekten auch Trocknungseffekte erfaßt. Um diese zu eliminieren, werden in Tabelle 11 und Abb. 28 und 29 die Festigkeiten nach Wasser- und Drucktopflagerung bei 95 °C auf die Festigkeiten nach Wasserlagerung bei 20 °C bezogen. Es ergeben sich um ca. 5 - 10 % geringere Festigkeitsverluste als bei Bezug auf die Lagerung 20 °C/65 % r.F., die ja Festigkeitsanstieg durch Trocknung bewirkt. Somit kann die Entfestigung durch Temperatureinwirkung von $T = 95\text{ °C}$ für die Druckfestigkeit des wassergesättigten Quarzkiesbetons mit ca. 15 - 20 % und für Kalksteinbeton mit etwa 25 - 30 % angegeben werden, wobei für die Entfestigung anscheinend im wesentlichen die Temperaturhöhe und weniger deren Einwirkungsdauer verantwortlich ist. Für die Spaltzugfestigkeit ergeben sich nur wenig geringere Festigkeitsverluste.

Betonfestigkeiten wurden in der Regel nach Abkühlung bestimmt, wie in Abschnitt 3.1 erläutert wurde. Zum Vergleich wurde in einigen Serien auch die Heißdruckfestigkeit bestimmt. In Tabelle 12 wurden die im heißen Zustand bestimmten Festigkeiten auf die Festigkeiten bezogen, die sich nach derselben Klimabeanspruchung, aber Prüfung nach Abkühlung ergaben. Die Druckfestigkeit im heißen Zustand scheint geringfügig ($< 10\%$) kleiner als im kalten Zustand zu sein. Die Ergebnisse sind aber überwiegend statistisch nicht signifikant. Für die Spaltzugfestigkeit kann keine Tendenz angegeben werden.

Um festzustellen, ob das Betonalter beim Einsetzen von Klimabeanspruchungen Einfluß auf die Festigkeitsänderungen ausübt, wurden in Tabelle 13 die Festigkeiten nach 40tägiger Klimatisierung, die im Betonalter $\tau_0 = 40\text{ d}$ begann, auf die Festigkeiten bezogen, die sich für ein Betonalter bei Klimatisierungsbeginn von $\tau_0 = 150\text{ d}$ ergaben. Die Ergebnisse sind größtenteils statistisch nicht signifikant und lassen keinen systematischen Einfluß des Betonalters erkennen.

Die Feuchtebedingungen bei Temperaturbeanspruchung sind entscheidend für die Festigkeitsänderungen. Dieser Schluß ist aus den Abb. 30 und 31 zu ziehen. Hier wurden die Festigkeitsänderungen nach Klimaeinwirkungen über der jeweiligen Feuchtebedingung aufgetragen. Drucktopflagerung verursacht den größten Druckfestigkeitsverlust für Quarzkiesbeton von ca. 20 % (Abb. 30). Mit zunehmender Austrocknungsmöglichkeit nimmt der Festigkeitsverlust ab. Während ansonsten die Einlagerungsdauer ohne entscheidenden Einfluß ist, kann bei der 95 °C/65 % r.F.-Lagerung eine zeitabhängige Festigkeitszunahme festgestellt werden. Ein gänzlich anderes, bisher nicht erklärbares Bild zeigt sich für die Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton (Abb. 31). Mit nur geringfügigem Festigkeitsverlust durch Drucktopflagerung und deutlichem, dabei kaum zeitabhängigem Verlust bis ca. 25 % für die Lagerung bei 65 % r.F. scheint hier die entgegengesetzte Tendenz wie für die Druckfestigkeit vorzuliegen.

7.2 Kurzzeitverformungsverhalten

Alle Spannungs-Dehnungslinien wurden in kraftgesteuerten Druckversuchen ($\dot{\sigma} \approx 0,5 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$) ermittelt. Nach Erreichen der Maximallast wurde von Hand entlastet. Die dargestellten Dehnungen sind die Mittelwerte der Ergebnisse von 3 auf den Probekörperumfang verteilten Dehnmeßstreifen (HBM, $l_0 = 6 \text{ cm}$). Die Ergebnisse wurden als Kolbenkraft-Dehnungslinien mittels X-Y-Schreibern aufgezeichnet. Aus in der Regel 2 Kolbenkraft-Dehnungslinien je Versuchsvariation entstanden durch Mittelung die in den Abb. 32 bis 41 dargestellten Spannungs-Dehnungslinien.

Die in den Tabellen 14a bis 14c und 15a, b enthaltenen Werte für den Elastizitätsmodul sind die Steigungen der Sekanten durch den Ursprung und den Punkt $\beta_c/3$ der Spannungs-Dehnungslinien.

Aus den Tabellen 14a und 14b ist ersichtlich, daß nach Wasserlagerung und Drucktopflagerung von Quarzkiesbeton bei stationärer Temperatur von 95 °C der E-Modul bis 10 % geringer ist, als nach einer Lagerung bei 20 °C/65 % r.F. Am Kalksteinbeton bewirken diese Klimaeinwirkungen E-Modul-Verluste bis ca. 20 %. Das Betonalter, die Vorlagerungsart und die Dauer der Klimaeinwirkung scheinen keinen deutlichen Einfluß auszuüben. Wird bei erhöhter Temperatur die relative Feuchtigkeit der Umgebungsluft konstant gehalten (65 und 95 % r.F.), also eine begrenzte Betontrocknung zugelassen, so stellen sich ebenfalls E-Modul-Verminderungen in der genannten Größenordnung ein. Die bei diesen Versuchen nach 30, 60, 90 und 120 d Klimaeinwirkungsdauer gemessenen E-Moduli sind ähnlich groß, so daß ein signifikanter Einfluß der Einwirkungsdauer auch hier nicht festgestellt werden kann (Tabelle 14c). Kann der Beton bei der Temperatureinwirkung frei austrocknen (95 °C/0), so ergeben sich für den E-Modul höhere Verluste, und zwar von etwa 20 - 25 % für Quarzkiesbeton und bis ca. 30 % für Kalksteinbeton.

Die E-Moduli, für den Fall, daß die erhöhte Temperatur nicht stationär, sondern zyklisch im wöchentlichen bzw. 14tägigen Wechsel mit gleichlangen Zeitabschnitten bei 20 °C einwirkt, sind in den Tabellen 15a und 15b enthalten. Nach 8 Zyklen je 14d, bzw. 5 Zyklen je 28 d können für Quarzkiesbeton Verluste bis 20 % festgestellt werden. Mit zunehmender Zyklenanzahl, es wurden Zwischenprüfungen nach 1 und 3 Zyklen vorgenommen, scheint der E-Modul geringer zu werden. Ob weitere Zyklen einen zusätzlichen Verlust am E-Modul bewirken können und wie hoch dieser ggf. ausfällt, ist aus den vorliegenden Ergebnissen nicht zuverlässig zu beantworten. Da nach 8 Zyklen ähnliche Verminderungen wie nach 5 Zyklen beobachtet wurden, ist zu vermuten, daß keine fortgesetzte E-Modul-Verminderung erfolgt. Zyklische Klimatisierung von Kalksteinbeton fand nur in sehr begrenztem Umfang statt; die Ergebnisse sind mit denen für Quarzkiesbeton vergleichbar.

Spannungs-Dehnungslinien, die im Anschluß an 40tägige stationäre Klimabeanspruchungen ermittelt werden, sind auf den Abb. 32 bis 35 dargestellt. Die Abb. 36 und 37 zeigen σ - ϵ -Linien, die nach 30, 60, 90 und 120 Tagen stationärer Klimaeinwirkungen ermittelt wurden. Auf den Abb. 38 bis 41 werden Spannungs-Dehnungslinien nach stationärer und zyklischer Klimaeinwirkung einander gegenübergestellt.

Aus den Spannungs-Dehnungslinien können die Kenngrößen E-Modul, Druckfestigkeit und Bruchdehnung, bzw. Dehnung unter Maximalspannung abgelesen werden. Über die Druckfestigkeit und den E-Modul wurde vorstehend berichtet. So dienen die Darstellungen der σ - ϵ -Linien vorrangig der Betrachtung der Bruchdehnungen. Es ist festzustellen, daß nach stationärer Klimaeinwirkung für den Fall der Betonfeuchthaltung (Wasserlagerung oder Drucktopf; Abb. 32 bis 35) die Bruchdehnung im Mittel nur etwa 2 % beträgt, während sie für nichtklimatisierten Beton bei etwa 2,5 % liegt. Kann Beton während der Temperaturbeanspruchung trocknen (95 °C/O, bzw. 95 °C/65 % r.F. u. 95 % r.F.), so ist diese "Versprödung", die insbesondere die Abb. 36 und 37 zeigen, nicht in dem Maße erkennbar. Auch infolge zyklischen Klimas tritt eine Verminderung der Bruchdehnung auf, wie den Abb. 38 bis 41 entnommen werden kann.

Bei der Bewertung der Ergebnisse für den E-Modul und auch der Spannungs-Dehnungslinien ist zu beachten, daß nur zwei Versuche je Variation durchgeführt wurden. Da die beiden Versuchsergebnisse häufig 10 bis 15 % Differenz voneinander aufwiesen und eine statistische Bewertung bei nur zwei Versuchen nicht möglich ist, sind Effekte in der Größenordnung der Meßwertdifferenzen mit Unsicherheit behaftet.

7.3 Wärmedehnungsverhalten

Die Ergebnisse der Temperaturdehnversuche an Betonzylindern $d = 8$ cm und $h = 16$ cm sind auf den Abbildungen 42 bis 44 dargestellt. Die Proben wurden mit $\dot{T} = 2$ K/min von 20 °C auf 95 °C aufgeheizt und nach etwa zweistündiger Haltezeit wieder auf 20 °C abgekühlt. Die Verformungsmessung erfolgte mittels eines Setzdehnungsmessers (Meßbasis 100 mm) nach jeweils 10 °C Temperaturänderung. Die in den Abbildungen angegebene Temperaturdehnzahl ist jeweils der Mittelwert der Steigungen von 10 °C-Temperaturintervallen.

Die Temperaturdehnung des Quarzkiesbetons ist für alle drei untersuchten Betonfeuchten (65 % r.F., wassersatt und ofentrocken; vgl. Abschn. 3.3) deutlich größer als die des Kalksteinbetons. Beton, der bei 20 °C/65 % r.F. bis zum hygrischen Gleichgewicht vorgelagert wurde, zeigt stärkere Temperaturdehnung als Beton, der bei 20 °C wassergelagert wurde oder dem vor der Aufheizung das verdampfbare Wasser durch Trocknung bei 105 °C entzogen wurde. Dies gilt für beide untersuchte Zuschlagarten. Die bei der Abkühlung ermittelten Temperaturdehnzahlen sind in allen Versuchen geringfügig kleiner als die bei der Aufheizung festgestellten. Bei der Aufheizung entstandene Dehnungen waren nach der Abkühlung nicht vollständig reversibel. Es verblieben Restdehnungen zwischen 0,5 und 1,0 % ohne eindeutige Zuordnung zur Zuschlagart.

Für die Dehnungen bei Temperaturänderung sind nach [5] im wesentlichen zwei Phänomene verantwortlich. Dies ist zum einen die Temperaturabhängigkeit der Molekülbewegungen und daraus folgend auch des Molekülabstandes, was die sog. wahre Temperaturdehnung erzeugt. Zum anderen wird bei einer Temperaturänderung das thermodynamische Gleichgewicht der inneren Kräfte im Zementstein durch die Verlagerung von Wassermolekülen im Porensystem gestört. Der hierdurch erzeugte Dehnungsanteil wird als scheinbare Wärmedehnung bezeichnet.

Die scheinbare Wärmedehnung ist deutlich vom Feuchtigkeitsgehalt des Zementsteins abhängig. Sie ist nach [5] bei etwa 60 - 70 % r.F. von maximaler Größe, während völlig wassergesättigter ebenso wie trockener Zementstein wegen dann fehlender Kapillarkräfte des Wassers keine scheinbare Wärmedehnung zeigt. Die Ergebnisse auf den Abb. 42 bis 44 bestätigen dieses.

Zementstein und Zuschlagstoffe haben in der Regel unterschiedliche Wärmedehnzahlen. Dadurch können beim Aufheizen von Beton Gefügespannungen entstehen, die eine innere Rißbildung zwischen der Zementsteinmatrix und insbesondere dem Grobzuschlag bewirken. Hierauf können möglicherweise die festgestellten Restdehnungen nach Abkühlung und die kleinere Wärmedehnzahl beim Abkühlungsvorgang zurückgeführt werden. In diesem Fall sollten aber die genannten Phänomene insbesondere beim Kalksteinbeton auftreten, da die Wärmedehnung kalzitischer Zuschläge deutlich geringer als die von Zementstein ist. In den Versuchsergebnissen ist das aber nicht festzustellen.

Um einen möglichen Einfluß langzeitiger Temperatureinwirkung und wiederholter Aufheizung auf das Wärmedehnverhalten zu ermitteln, werden die im Zusammenhang mit Kriechversuchen an Hohlzylindern ($h = 60$ cm) durchgeführten Schwindversuche herangezogen. Während Aufheizungen und Abkühlungen wurden die Verformungen mittels induktiver Wegaufnehmer gemessen (vgl. Abschn. 6.2). In den Abb. 45 und 46 sind die thermischen Dehnungen von Quarzkiesbeton, der bis Versuchsbeginn 150 d bei 20 °C/65 % r.F. oder 20 °C/95 % r.F. gelagert wurde, dargestellt. Die Darstellungen enthalten keine Schwind- oder Quellverformungen, die während Temperaturhaltezeiten bei 20 °C oder 95 °C aufgetreten sind.

Aus Abb. 45 ist ersichtlich, daß die nach einer 25- bzw. 40tägigen Klimaeinwirkung (95 °C/95 % r.F. bzw. 95 °C/65 % r.F.) bei der nachfolgenden Abkühlung ermittelten thermischen Dehnungen deutlich unter den Dehnungen bei der Aufheizung liegen, als dies für den Fall baldiger Wiederabkühlung nach Aufheizung festgestellt wurde (Abb. 42). Dies kann auf die zunehmende Trocknung des Zementsteins bei Einwirkung erhöhter Temperatur und die damit einhergehende Verringerung der scheinbaren Wärmedehnung zurückgeführt werden.

Wie Abb. 46 zeigt, bewirken wiederholte Aufheizungen ebenfalls eine Verringerung der Temperaturdehnungen. Interessanterweise zeigt sich eine irreversible Restdehnung nur nach der ersten Abkühlung, während bei nachfolgenden Temperaturzyklen Aufheiz- und Abkühldehnzahl etwa gleich groß sind. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, daß innere Rißbildung im wesentlichen durch die erstmalige Aufheizung hervorgerufen wird und nachfolgende Aufheizungen nicht zu neuen Rissen führen, aber fortschreitende Trocknung die beobachtete Verringerung der Wärmedehnzahl bewirkt.

7.4 Kriechen

Die Verformungsmessungen auf den Betonhohlzylindern ($d_a = 15$ cm, $d_i = 5$ cm, $h = 60$ cm) bei den Kriech- und Schwindversuchen erfolgten mit jeweils drei induktiven Wegaufnehmern, die auf den Umfang verteilt wurden. Trotz der Verwendung von Axial-Gelenklagern und trotz sorgfältigen Einbaus der Probekörper zeigten sich bereits beim Belastungsvorgang und im nachfolgenden Beobachtungszeitraum Dehnungsdifferenzen zwischen den drei Wegaufnehmern. Ursache für diese Dehnungsdifferenzen werden neben unvermeidlichen Ausmittigkeiten beim Einbau vermutlich stoffliche Inhomogenitäten sowie geometrische Fehler der Probekörper gewesen sein. Letzters betrifft insbesondere Abweichungen der geschnittenen und geschliffenen Stirnflächen von der Parallelität und außerdem nicht exakte Orthogonalität zwischen Stirnflächen und Zylinderachse.

Bezieht man den größten bzw. kleinsten gemessenen Randdehnungswert auf die mittlere Dehnung, so erhält man im Mittel über alle 32 Kriechkörper einen Unterschied von 9,6 %. Der minimale Unterschied beträgt 2,4%, der maximale 22,0%.

Da alle Kriechkörper mit ca. 30 % ihrer Druckfestigkeit im Belastungsalter belastet wurden und bekanntlich bis ca. 50 % Proportionalität zwischen den Kriechverformungen und dem Belastungsgrad vorliegt, bleiben die festgestellten Dehnungsdifferenzen ohne Auswirkung auf die Kriechzahl $\varphi = \epsilon_k / \epsilon_{el}$.

Alle gemessenen Längsdehnungen infolge von Temperatur, Last und Zeit sind in den Abbildungen 47 bis 58 in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. In jeder Serie (s. Tabelle 4) wurden gemäß Versuchsprogramm (vgl. Abschn. 3.2) zwei belastete und eine unbelastete Probe beobachtet. In den genannten Abbildungen wurden jeweils die mittleren Dehnungen eines (unbelasteten) Probekörpers bzw. zweier (belasteter) Probekörper aufgetragen.

Die Ergebnisse der Kriechversuche, in denen die Belastung nach der Aufheizung erfolgte (Belastungszeitpunkt A gem. Tabelle 4), sind in den Abbildungen 47 - 50, 52, 53 enthalten. In Abb. 49 sind die einzelnen Verformungsanteile anschaulich dargestellt: Infolge der Aufheizung mit $\dot{T} = 5 \text{ K/h}$ von 20 °C auf 95 °C entwickelt sich die thermische Ausdehnung ϵ_T . Drei Stunden nach dem Erreichen von 95 °C wird zum Zeitpunkt τ_0 die Kriechspannung $\sigma_k = 0,30 \cdot \beta_D(\tau_0) = 15 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht, welche die elastische Dehnung $\epsilon_{el}(\tau_0)$ erzeugt. Im Anschluß daran, bei nun konstanter Last, entwickeln sich Kriechdehnungen $\epsilon_k(t)$, bzw. an der unbelasteten Probe die Schwinddehnungen $\epsilon_s(t)$. Bei Entlastung zum Zeitpunkt τ_e erfolgt die elastische Rückverformung $\epsilon_{el}(\tau_e)$, und im weiteren Verlauf wird die verzögert-elastische Rückverformung $\epsilon_v(t)$ beobachtet. Nach insgesamt 60tägiger Versuchsdauer wird mit $\dot{T} = 5 \text{ K/h}$ abgekühlt.

Die Ergebnisse derjenigen Kriechversuche, in denen zuerst belastet und anschließend im belasteten Zustand aufgeheizt wird (Belastungszeitpunkt B gem. Tabelle 4), sind in den Abbildungen 51, 54 - 56 enthalten. In Abb. 51 werden die Verformungsanteile dargestellt: Zum Zeitpunkt $\tau_0 = 0$ wird bei 20 °C belastet und nach ca. 3 Stunden mit $\dot{T} = 5$ K/h aufgeheizt. In diesem Fall können die Kriechdehnungen nicht unmittelbar abgelesen werden, weil auch die thermische Dehnung ϵ_T in den Verformungswerten enthalten ist. Die Gesamtdéhnung einer belasteten Probe ergibt sich zu $\epsilon_{ges}(t) = \epsilon_k(t) + \epsilon_s(t) + \epsilon_{el}(\tau_0) - \epsilon_T$. An einer unbelasteten Probe werden ϵ_T und $\epsilon_s(t)$ gemessen. Entlastung und Beobachtung der verzögert-elastischen Rückverformung erfolgen bei 95 °C, nach 60 Tagen Versuchsdauer wird abgekühlt.

In den Abbildungen 57 und 58 sind die Ergebnisse der Vergleichskriechversuche bei 20 °C dargestellt.

Die Ergebnisse der Betontrocknung an miteingelagerten Betonscheiben (s. Abschn. 4.2) zeigen die Abbildungen 59 und 60. Bis zum Erreichen annähernder Ausgleichsfeuchte benötigen die Hohlzylinder bei 95 °C ca. 300 Stunden. Bei zyklischer Klimabeanspruchung wird kein Ausgleichszustand erreicht. Die Probenfeuchte alterniert sowohl für Quarzkies- als auch Kalksteinbeton um eine mittlere Feuchte von etwa 3 M.-%, bezogen auf das Trockengewicht.

Vergleichende Betrachtungen über die Beeinflussung der Kriechverformungen durch klimatische Beanspruchung können nicht direkt aus den protokollarischen Darstellungen der Abbildungen 47 - 58 vorgenommen werden. Darum wird folgenderweise ausgewertet: Eine belastete Probe zeigt die zeitabhängige Déhnung ϵ_k^* , die aus Kriech- und Schwindanteilen besteht:

$$\epsilon_k^*(t) = \epsilon_k(t) + \epsilon_s(t)$$

Die gemeinsame Erfassung von Kriech- und Schwindverformungen bietet den Vorteil, auf die ansonsten erforderliche aber nur bedingt zutreffende Annahme, die Schwindverformungen belasteter und unbelasteter Körper seien gleich, verzichten zu können. Darüber hinaus wird dieser Ansatz auch der Realität der Beanspruchungen in Langzeitwärmespeichern gerecht. Aus ϵ_k^* ergibt sich die Kriechzahl φ^* zu

$$\varphi^* = \frac{\epsilon_k^*(t)}{\epsilon_{el}(\tau_0)}$$

In den Abbildungen 61 - 66 ist die Kriechzahl φ^* für alle Kriechversuche bei 95 °C und 20 °C in Funktion der Belastungszeit in einfach-logarithmischem Maßstab dargestellt.

Wasserlagerung bei 95 °C bewirkt sowohl bei Quarzkies- als auch bei Kalksteinbeton nach 40tägiger Belastung Kriechzahlen φ^* von ca. 1,80, während bei 20 °C die Kriechzahl bei 0,70 liegt (Abb. 61, 62). Auch nach 40 Tagen ist noch ein deutlicher Kriechzuwachs festzustellen. Demgegenüber scheint sich bei Proben, die begrenzt trocknen können (95 °C/65 % r.F.: Abb. 63, 64 und 95 °C/95 % r.F.: Abb. 65, 66) eine Beruhigung einzustellen. Der Vergleich der Abb. 63 und 64 zeigt, daß der Kalksteinbeton bei 65 % r.F. größere Kriechverformungen aufweist als Quarzkiesbeton. Bei 95 % r.F. ist kein deutlicher Unterschied feststellbar.

Von großem Einfluß auf die Entwicklung der Kriechverformungen ist der Belastungszeitpunkt. Abb. 63 zeigt dies für Quarzkiesbeton bei 95 °C/65 % r.F. Erfolgt die Aufheizung von 20 °C auf 95 °C im belasteten Zustand, so entsteht - während der Aufheizung und einige Zeit danach - eine hohe Kriechgeschwindigkeit (Serie K 2, B). Im Anschluß daran ist der Kriechzuwachs etwa mit dem für Aufheizung vor Belastung (Belastungszeitpunkt A) identisch. Eine Annäherung der

beiden Kriechkurven (Serie K 2, B und Serie K 2, A), die darauf hinweisen würde, daß eine Aufheizung unter Last keine zusätzlichen Kriechverformungen bewirkt, sondern nur eine beschleunigte Entwicklung, ist im Beobachtungszeitraum von 40 Tagen nicht festzustellen.

Folgen der 1. Aufheizung unter Last weitere Temperaturwechsel zwischen 95 °C und 20 °C (Serie K 3, Z: Abb. 65, 66), so ist zu beobachten, daß die Kriechbeschleunigung der 1. Aufheizung in keiner nachfolgenden wieder erreicht wird. Insgesamt unterscheidet sich die Entwicklung der Kriechverformung bei Temperaturzyklen nicht deutlich von jener bei stationärer Temperatureinwirkung nach vorheriger Aufheizung unter Last.

Tabelle 16 faßt die Kriechzahlen φ^* nach 40tägiger Belastung für alle 16 Kriechserien zusammen. Der Vergleich der Kriechzahlen für 95 °C und 20 °C $\varphi^*(95\text{ °C})/\varphi^*(20\text{ °C})$ liefert Kriecherhöhungsfaktoren, die abhängig von Zuschlagart und Belastungszeitpunkt zwischen etwa 2,3 und 4,4 liegen. Aufheizung unter Last sowie nachfolgende Temperaturzyklen verursachen im Beobachtungszeitraum von 40 Tagen bis 1,4fache Kriechverformung gegenüber den Kriechserien "A" (Aufheizung vor Belastung).

In den Abb. 67 und 68 ist das Verhältnis der Kriechzahlen $\varphi^*(95\text{ °C})/\varphi^*(20\text{ °C})$ in Abhängigkeit von der Belastungszeit dargestellt. Bei 95 °C/65 % r.F. sowie 95 °C r.F. sind anfangs 5- bis 6fache Kriechverformungen gegenüber 20 °C zu erkennen, die mit zunehmender Belastungszeit auf 2 bis 3 zurückgehen. Wassergelagerter Beton bei 95 °C zeigt zu Beginn nur ca. 3fache Kriechverformung gegenüber 20 °C. Dieser Wert verändert sich im Beobachtungszeitraum nicht eindeutig.

Abb. 69 zeigt das belastungszeitabhängige Verhältnis der Kriechzahlen für den Belastungszeitpunkt "B" gegenüber "A". Bis zum Aufheizbeginn nach 3stündiger Belastungszeit ist die Kriechverformung gering, steigt dann während der Aufheizung und noch einige Zeit danach stark an und erreicht nach 40tägiger Belastung einen Verhältniswert von 1,3 bis 1,4 (vgl. Tabelle 16).

In Langzeitwärmespeichern sind belastete Betonbauteile während erheblich längerer Zeiträume einer erhöhten Temperatur ausgesetzt als im Experiment simuliert werden kann. Deshalb werden die während 40tägiger Belastung beobachteten Kriechverformungen extrapoliert.

Ein hierfür geeignetes Verfahren stammt von Ross [6], der den zeitlichen Verlauf des Kriechens mittels eines Hyperbelansatzes der Formel

$$\epsilon_k = \frac{t}{a+b \cdot t}$$

beschreibt. Darin ist t die Belastungsdauer und ϵ_k die Kriechdehnung. Nach sehr langer Belastungszeit ($t \rightarrow \infty$) ergibt sich hieraus die Kriechdehnung $\epsilon_{k\infty}$ (Endkriechdehnung) zu:

$$\epsilon_{k\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{a}{t} + b} = \frac{1}{b}$$

Trägt man nach Umformung des Ross-Ansatzes in

$$\frac{t}{\epsilon_k} = a + b \cdot t$$

$\frac{t}{\epsilon_k}$ über t auf, ergibt sich die Endkriechdehnung anschaulich aus der Steigung der Tangente an die Kurve der Meßwerte.

In Abb. 70 ist die Ermittlung der Endkriechdehnung nach Ross anhand der Meßwerte der Versuchsserie K 3, B, Quarzkiesbeton, beispielhaft dargestellt.

Da die Kurve der Kriechdehnungen in der Darstellung nach Ross zumindest im anfänglichen Zeitbereich deutlich von einer Geraden abweicht, ist die Konstruktion einer Tangente problematisch. Erst mit zunehmender Versuchsdauer (= Belastungszeit) scheint sich die Kurve an die Steigung anzuschmiegen, die der Endkriechdehnung entspricht. Nach kurzer Belastungszeit konstruierte Tangenten weisen eine zu große Steigung auf und unterschätzen somit die Endkriechdehnung $\epsilon_{k\infty} = 1/b$.

Neville [7] ermittelte diesen Fehler bei der Extrapolation in Abhängigkeit von der Versuchsdauer für eine Reihe von Kriechversuchen bei Normaltemperatur. Nach Abb. 71, in der Nevilles Ergebnis dargestellt ist, führt die Extrapolation mit dem Ross-Ansatz nach 40tägiger Versuchsdauer zu einer Unterschätzung der Endkriechdehnung um ca. 17 %.

Darüber hinaus ist die Eignung der Ross-Extrapolation für Kriechversuche bei erhöhter Temperatur möglicherweise begrenzt; hier liegen keine Erfahrungswerte vor.

Somit sind die durch die Ross-Extrapolation ermittelten und in Tabelle 17 zusammengefaßten Endkriechzahlen für alle in diesem Vorhaben durchgeführten Kriechversuche als Anhaltswerte zu verstehen, die die tatsächlichen Dehnungen nach sehr langer Belastungszeit möglicherweise unterschätzen. Die Verhältnisswerte der Endkriechzahlen liegen in der gleichen Größenordnung wie die der Kriechzahlen nach 40tägiger Belastung (Tabelle 16).

8. Zusammenfassung

Warmwasserbecken (bis 95 °C) können als Langzeitwärmespeicher dienen. Teile derartiger, in Betonbauweise zu errichtender Speicherbecken sind Temperaturen bis 95 °C ausgesetzt. Dabei können die Bauteile entweder unter Wasser sein oder oberhalb des Wasserspiegels von Luft mit unterschiedlicher relativer Feuchte bis hin zur Dampfsättigung umgeben sein. In der vorliegenden Forschungsarbeit wurden die Auswirkungen der Klimabeanspruchung in Wärmespeichern auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton, einschließlich Kriechen, in Abhängigkeit betontechnologischer und lagerungsbedingter Parameter untersucht, um eine Grundlage für die Bemessung der Bauteile von Langzeitwärmespeichern zu schaffen.

Es wurden zwei Betone mit unterschiedlicher Zuschlagart, nämlich Quarzkies und Kalkstein, aber ansonsten unveränderter Zusammensetzung untersucht (PZ 35 F, $Z = 350 \text{ kg/m}^3$, $W/Z = 0,54$). Wesentliche Lagerungsparameter waren: Vorlagerungsart (unter Wasser, 65 und 95 % r.F.), Vorlagerungsdauer (40 und 150 d), Klimabeanspruchung (95 °C bei Wasserlagerung, 65 und 95 % r.F.), Dauer der Klimabeanspruchung (zwischen 40 und 150 d). Es wurden folgende Materialkennwerte und -beziehungen untersucht: Zylinderdruckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Druck-Elastizitätsmodul, Spannungs-Dehnungsverhalten, Wärmedehnungsverhalten und Kriechen. Wichtiger Untersuchungsparameter beim Kriechen war der Zeitpunkt der Lastaufbringung: vor bzw. nach der Aufheizung.

Die Untersuchung der Druckfestigkeit und des E-Moduls erfolgte an Zylindern 8/30 cm, die der Spaltzugfestigkeit an Zylindern 8/8 cm. Für Kriechuntersuchungen wurden hauptsächlich Hohlzylinder ($d_a = 15 \text{ cm}$, $d_i = 5 \text{ cm}$, $h = 60 \text{ cm}$) verwendet, die in einem neu entwickelten Prüfstand geprüft wurden.

Zu den Untersuchungsergebnissen:

8.1 Zylinderdruckfestigkeit

- Feuchtgehaltener Quarzkiesbeton (Wasser- oder Drucktopflagerung) zeigt bei einer Dauertemperatur von 95 °C einen Druckfestigkeitsverlust von bis ca. 25 %, Kalksteinbeton bis ca. 30 % gegenüber Lagerung bei 20 °C/65 % r.F. Die Einlagerungsdauer ist im wesentlichen ohne Einfluß.
- Bei begrenzt trocknendem Beton (65 bzw. 95 % r.F.) wird die thermisch bedingte Entfestigung durch zunehmende Trocknung kompensiert. Nach 120 d Klimaeinwirkung ist eine Druckfestigkeitszunahme von ca. 10 % zu verzeichnen.
- Eine zyklische Klimaeinwirkung zwischen 95 und 20 °C bewirkt im Beobachtungszeitraum von 120 d eine geringfügig größere Entfestigung als stationäres Klima. Ein Festigkeitsgewinn entsteht auch bei Trocknung nicht.
- Das Betonalter beim Einsetzen von Klimabeanspruchungen (40 d und 150 d) übt ebenso wie die Temperatur bei der Festigkeitsprüfung (95 °C oder 20 °C) einen nur geringen Einfluß aus.

8.2 Spaltzugfestigkeit

- Die Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton sinkt um ca. 25 %, die von Kalksteinbeton um ca. 30 % ab.
- Die Einlagerungsdauer ist im wesentlichen ohne Einfluß. Eine verlustkompensierende Wirkung von Trocknung tritt nicht auf, sondern scheint zusätzliche Entfestigung zu bewirken.

8.3 Spannung-Dehnungsverhalten, E-Modul

- Feuchthaltung und stationäre Temperatur von 95 °C bewirken bis 10 % E-Modulverlust für Quarzkiesbeton und bis 20 % für Kalksteinbeton.
- Begrenzte Trocknung bei 95 °C (65 % r.F. bzw. 95 % r.F.) führt zu vergleichbaren Ergebnissen, während völlig freie Austrocknung den E-Modul bis zu 30 % vermindert.
- Das Betonalter, die Vorlagerungsart und die Dauer der Klimaeinwirkung sind von geringem Einfluß. Mit zunehmender Anzahl von Temperaturzyklen wird der E-Modul geringer.
- Die Bruchdehnung nimmt bei stationärer Temperatur und Feuchthaltung von ca. 2,5 % auf 2,0 % ab, während sie bei Trocknung nicht eindeutig verändert wird. Zyklische Klimaeinwirkung führt ebenfalls zur Bruchdehnungsverminderung in der genannten Größenordnung.

8.4 Wärmedehnungsverhalten

- Die Wärmedehnung von Quarzkiesbeton ist deutlich größer als die von Kalksteinbeton. Feuchter und trockener Beton haben eine geringere Wärmedehnung als zuvor bei 65 % r.F. gelagerter Beton.
- Die Wärmedehnung bei Abkühlung ist geringer als bei Aufheizung. Nach Abkühlung verbleibt eine irreversible Restdehnung von 0,5 bis 1 ‰.
- Wiederholte Aufheizungen bewirken eine Verminderung der Wärmedehnung. Nur die 1. Abkühlung führt zu einer irreversiblen Restdehnung.

8.5 Kriechen

- Die zeitabhängige Dehnung infolge Kriechens und Schwindens bei 95 °C erreicht nach 40tägiger Belastung den 2,3- bis 4,4fachen Wert gegenüber 20 °C.
- Aufheizung unter Last bewirkt anfangs eine hohe Kriechgeschwindigkeit. Einige Zeit nach Abschluß der Aufheizung ist der Kriechzuwachs etwa mit dem für eine Aufheizung vor Belastung identisch. Nach 40tägiger Belastung beträgt der Verhältniswert der zeitabhängigen Verformungen für eine Aufheizung unter Last gegenüber einer Belastung nach Aufheizung etwa 1,3 bis 1,4; ohne Tendenz einer Angleichung.
- Folgen der 1. Aufheizung unter Last weitere Temperaturwechsel zwischen 95 °C und 20 °C, so entstehen keine deutlich größeren Kriechverformungen als bei stationär einwirkenden 95 °C.
- Die Extrapolation der in 40tägiger Belastungszeit gemessenen Verformungen auf Endwerte nach sehr langer Belastung mit dem Ross-Verfahren liefert Kriecherhöhungsfaktoren für 95 °C gegenüber 20 °C zwischen ca. 2 und 4.

9. Literatur

- [1] BREUER,W.;DYHR,R.;STRICKRODT,J.;
Langzeitwärmespeicher Prototyp Wolfsburg
Fernwärme International,Vol.10,1981,H.1,S.19-24
- [2] HILSDORF,H.K.:
Austrocknung und Schwinden von Beton
Stahlbetonbau,Berichte aus Forschung und Praxis
(Rüsch-Festschrift),1969
- [3] ROSTASY,F.S.;BUDELMANN,H.:
Prüftechnologie des Betonkriechens bei erhöhter Temperatur
und veränderlicher Feuchte im instationären Zustand
Forschungsbericht,TU Braunschweig,1984
- [4] FISCHER,R.:
Über das Verhalten von Zementmörtel und Beton bei höheren
Temperaturen
DAfStb,Heft 214,1970
- [5] DETTLING,H.:
Die Wärmedehnung des Zementsteines,der Gesteine und der
Betone
Dissertation,TH Stuttgart,1961
- [6] ROSS,A.D.:
Concrete creep data
The Structural Engineer,Vol.15,1937,No.8
- [7] NEVILLE,A.M.;DILGER,W.H.;BROOKS,J.J.:
Creep of plain and structural concrete
Construction Press,London,1983

Tabellen

Tabelle 1a: Kombinationen von Vorlagerung/Betrieb und Probekörperanzahlen für stationäre Klimaeinwirkung







Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Probekörperanzahl (Quarzkieszuschlag/ Kalksteinzuschlag)				Prüf- temperatur	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	β_C	β_{SZ}	E	σ/ϵ	warm	kalt
F 1	20 °C/ 	40	95 °C/ 	40	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 2		150		120	11/9	11/9	2/2	2/2		x
F 3		40		40	3/3	3/3	-	-	x	
F 4		150		120	5/3	5/3	-	-	x	
F 5	20 °C/ 	40	95 °C/ 	40	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 6		150		120	11/-	11/-	2/-	2/-		x
F 7	20 °C/ 	40	95 °C/0	40	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 8		40		40	3/3	3/3	-	-	x	
F 9	20 °C/65 % r.F.	40	95 °C/ 	40	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 10		150		120	11/9	11/9	2/2	2/2		x
F 11		40		40	3/3	3/3	-	-	x	
F 12		150		120	5/3	5/3	-	-	x	

Tabelle 1b: Kombinationen von Vorlagerung/Betrieb und Probekörperanzahlen für stationäre Klimaeinwirkung


Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Probekörperanzahl (Quarkieszuschlag/ Kalksteinzuschlag)				Prüf- temperatur	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	β_C	β_{SZ}	E	σ/ϵ	warm	kalt
F 13	20 °C/65 % r.F.	40	95 °C/ 	40	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 14		150		120	11/-	11/-	2/-	2/-		x
F 15	20 °C/65 % r.F.	40	95 °C/0	40	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 16		40		40	3/3	3/3	-	-	x	
F 17	20 °C/65 % r.F.	150	95 °C/65 % r.F.	120	20/-	20/-	8/-	8/-		x
F 18	20 °C/95 % r.F.	150	95 °C/95 % r.F.	120	20/-	20/-	8/-	8/-		x

Tabelle 2a: Kombination von Vorlagerung/Betrieb und Probekörperanzahlen für zyklische Klimaeinwirkung







Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Probekörperanzahl (Quarzkieszuschlag/ Kalksteinzuschlag)				Prüf- temperatur	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	β_C	β_{SZ}	E	σ/ϵ	warm	kalt
F 1, Z	20 °C/ 	40	95 °C/  u. 20 °C/65 % r.F.	3 Zyklen je 14 d = 42 d	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 2, Z		150		8 Zyklen je 14 d = 112 d	9/9	9/9	6/6	6/6		x
F 5, Z	20 °C/ 	40	95 °C/  u. 20 °C/65 % r.F.	3 Zyklen je 14 d = 42 d	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 6, Z		150		8 Zyklen je 14 d = 112 d	9/-	9/-	6/-	6/-		x
F 9, Z	20 °C/65 % r.F.	40	95 °C/  u. 20 °C/65 % r.F.	3 Zyklen je 14 d = 42 d	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 10, Z		150		8 Zyklen je 14 d = 112 d	9/9	9/9	6/6	6/6		x
F 13, Z	20 °C/65 % r.F.	40	95 °C/  u. 20 °C/65 % r.F.	3 Zyklen je 14 d = 42 d	3/3	3/3	2/2	2/2		x
F 14, Z		150		8 Zyklen je 14 d = 112 d	9/-	9/-	6/-	6/-		x

Tabelle 2b: Kombination von Vorlagerung/Betrieb und
Probekörperanzahlen für zyklische Klimaeinwirkung

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Probekörperanzahl (Quarzkieszuschlag/ Kalksteinzuschlag)				Prüf- temperatur	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	β_C	β_{SZ}	E	σ/ϵ	warm	kalt
F 17, Z	20 °C/65 % r.F.	150	95 °C/65 % r.F.u. 20 °C/65 % r.F.	5 Zyklen je 28 d = 140 d	20/-	20/-	6/-	6/-		x
F 18, Z	20 °C/95 % r.F.	150	95 °C/95 % r.F.u. 20 °C/65 % r.F.	5 Zyklen je 28 d = 140 d	20/-	20/-	6/-	6/-		x

Tabelle 3: Vergleichsserien bei Normaltemperatur










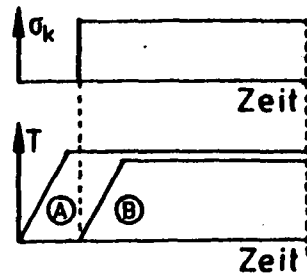
Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Probekörperanzahl (Quarzkieszuschlag/ Kalksteinzuschlag)			
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	β_C	β_{SZ}	E	σ/ϵ
FV 1	20 °C/65 % r.F.	40	20 °C/65 % r.F.	40	3/3	3/3	2/2	2/2
FV 2		150		120	3/3	3/3	2/2	2/2
FV 3	20 °C/ 	40	20 °C/ 	40	3/3	3/3	2/2	2/2
FV 4		150		120	3/3	3/3	2/2	2/2
FV 5	20 °C/ 	40	20 °C/65 % r.F.	40	3/3	3/3	2/2	2/2
FV 6		150		120	3/3	3/3	2/2	2/2
FV 17	20 °C/65 % r.F.	150	20 °C/65 % r.F.	120	3/3	3/3	2/2	2/2
FV 18	20 °C/95 % r.F.	150	20 °C/95 % r.F.	120	3/3	3/3	2/2	2/2

Tabelle 4: Kombinationen von Vorlagerung und Betrieb für Kriechversuche

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung			Zuschlagart		Klima bei verz.-elast. Rückverformung	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	Belastungszeitpunkt*	Quarz-kies	Kalkstein	Art	Dauer [d]
K1,A	20°C/ 	200	95°C/ 	40	A	X	X	20°C/ 	20
K2,A	20°C/65%r.F.	150	95°C/65%r.F.	40	A	X	X	95°C/65%r.F.	20
K2,B	20°C/65%r.F.	150	95°C/65%r.F.	40	B	X		95°C/65%r.F.	20
K3,A	20°C/95%r.F.	150	95°C/95%r.F.	40	A	X	X	95°C/95%r.F.	20
K3,B	20°C/95%r.F.	150	95°C/95%r.F.	40	B	X		95°C/95%r.F.	20
K3,Z	20°C/95%r.F.	150	95°C/95%r.F. +20°C/95%r.F.	6 Zyklen je 7d=42d	B	X	X	20°C/95%r.F.	20
Vergleichsserien bei 20°C									
KV1	20°C/ 	200	20°C/ 	40		X	X	20°C/ 	20
KV2	20°C/65%r.F.	150	20°C/65%r.F.	40		X	X	20°C/65%r.F.	20
KV3	20°C/95%r.F.	150	20°C/95%r.F.	40		X	X	20°C/95%r.F.	20



* Belastungszeitpunkt

Ⓐ = Belastung nach Aufheizung

Ⓑ = Aufheizung unter Last










Tabelle 5: Betonzusammensetzungen und Frischbetondaten

Nr. der Betonage	Versuchs- serien	Zuschlag - art	Betonzusammensetzung (Istwert)			Frischbetondaten			
			Z [kg/m ³]	W/Z	G [kg/m ³]	Ausbreitmaß a [cm]	Verdichtungs - maß v	LP - Gehalt [Vol. - %]	FB - Rohdichte ρ_{FB} [kg/dm ³]
1	F 1-F 16 FV 1-FV 6	Quarzkies	353	0,53	1855	34,5	1,15	2,2	2,39
2	F 1,Z -F 14,Z K 1,KV 1	Kalkstein	350	0,58	1829	34	1,09	1,8	2,38
3	F 17 K 2,KV 2	Quarzkies	351	0,54	1849	35	1,16	2,3	2,39
4		Kalkstein	350	0,59	1835	34	1,08	1,7	2,39
5	K 5,KV 3 F 18	Quarzkies	352	0,56	1831	33	1,16	2,4	2,38
6		Kalkstein	350	0,59	1824	34	1,08	1,7	2,38
7	K 3,K 6 F 17,Z	Quarzkies	354	0,52	1854	34,5	1,12	2,2	2,39
8	K 4,K 7 F 18,Z	Quarzkies	352	0,56	1830	34	1,16	2,4	2,38
9	K 5,Z	Quarzkies	351	0,54	1850	35	1,12	2,2	2,39

Tabelle 6: Mittlere Würfeldruckfestigkeiten (Kantenlänge 15cm)

Nr. der Betonage	mittl. Würfeldruckfestigkeit β_{wm} [N/mm ²]		
	Alter : 28 d Lagerung : 7d feucht + 21d 20/65	Alter : 150 d Lagerung : 7d feucht + 143d 20/65	Alter : 150 d Lagerung : versiegelt
1	52	57	53
2	49	52	50
3	50	55	51
4	46	50	49
5	48	50	43
6	47	50	48
7	55	58	53
8	52	55	51
9	51	59	59

**Tabelle 7a: Mittlere Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit
nach stationärer Klimaeinwirkung**

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Zylinderdruckfestigkeit				Spaltzugfestigkeit				Proben- anzahl N	Prüf- temperatur	
					Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag				
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_C$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_C$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_{SZ}$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_{SZ}$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]		warm	kalt
F1-F8 FW3-FW5	20°C/ 	40	-	-	40,2	0,14	38,2	0,74	2,72	0,17	2,99	0,24	3		
F1,Z- F6,Z		150	-	-	48,4	0,98	45,2	0,56	3,84	0,19	3,68	0,15	3		
FW3	20°C/ 	40	20°C/ 	40	44,4	1,84	45,2	0,24	2,81	0,23	3,61	0,15	3		
FW4		150		120	46,8	1,99	47,2	1,59	3,92	0,14	4,72	0,30	3		
FW5	20°C/ 	40	20°C/65% r.F.	40	51,1	0,88	48,3	0,93	3,10	0,18	4,03	0,22	3		
FW6		150		120	55,2	1,77	49,5	0,92	4,33	0,12	4,46	0,19	3		
F1	20°C/ 	40	95°C/ 	40	43,9	1,47	35,3	0,12	2,79	0,13	3,80	0,22	3		x
F3		40		40	43,5	0,56	32,0	0,45	3,18	0,21	3,22	0,23	3	x	
F2		150		40	40,5	1,13	33,6	0,99	3,15	0,30	3,94	0,30	3		x
				80	42,3	1,44	35,1	1,37	3,18	0,24	3,50	0,29	3		x
				120	42,0	1,59	33,7	1,91	3,29	0,32	3,58	0,13	5 bzw. 3		x
F4		150		120	37,1	0,84	31,9	0,37	3,25	0,22	3,51	0,22	5 bzw. 3	x	
F5	20°C/ 	40	95°C/ 	40	38,2	2,27	36,2	1,31	2,67	0,72	3,54	0,03	3		x
F6		150		40	39,0	1,91	-	-	3,47	0,29	-	-	3		x
				80	42,8	2,02	-	-	3,55	0,22	-	-	3		x
				120	40,2	1,27	-	-	4,0	0,27	-	-	5		x
F7	20°C/ 	40	95°C/0	40	44,1	0,96	41,2	1,18	3,13	0,38	3,10	0,22	3		x
F8		40		40	44,9	1,50	39,9	0,49	3,63	0,33	3,73	0,12	3	x	

**Tabelle 7b: Mittlere Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit
nach stationärer Klimaeinwirkung**







Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Zylinderdruckfestigkeit				Spaltzugfestigkeit				Proben- anzahl N	Prüf- temperatur	
					Quarkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarkieszuschlag		Kalksteinzuschlag				
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	Mittel- wert $\bar{\delta}_C$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert $\bar{\delta}_C$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert $\bar{\delta}_{SZ}$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert $\bar{\delta}_{SZ}$ [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]		warm	kalt
F9-F16 FV1, FV2 F9, Z- F14, Z	20°C/65% r.F.	40	-		42,1	1,97	38,9	1,14	3,90	0,04	3,07	0,18	3		
		150	-		50,4	0,78	47,2	1,21	4,51	0,32	4,57	0,29	3		
FV1 FV2	20°C/65% r.F.	40	20°C/65% r.F.	40	50,4	0,37	47,5	1,19	3,08	0,12	4,61	0,14	3		
		150		120	52,7	1,71	48,5	1,46	4,26	0,34	3,79	0,17	3		
F9 F11 F10	20°C/65% r.F.	40 40 150	95°C/ 	40 40 40 80 120	43,4 40,3 44,0 44,1 47,2	1,99 1,17 1,30 2,11 2,52	32,0 28,6 31,9 33,7 30,4	0,33 1,28 0,98 1,14 1,27	2,45 3,08 3,72 3,47 3,70	0,24 0,33 0,24 0,29 0,20	2,94 2,96 3,10 2,79 3,00	0,33 0,08 0,14 0,30 0,24	3 3 3 3 5 bis 3	 x 	x x x x
F12		150		120	41,5	0,95	30,1	0,22	3,50	0,23	3,21	0,25	5 bis 3	x	
F13 F14	20°C/65% r.F.	40 150	95°C/ 	40 40 80 120	41,1 41,0 44,1 44,3	0,38 2,01 1,34 2,15	33,5 - - -	1,88 - - -	3,18 3,99 3,86 4,30	0,48 0,27 0,14 0,27	3,56 - - -	0,09 - - -	3 3 3 5	 x x x	x x x
F15 F16	20°C/65% r.F.	40 40	95°C/0	40 40	44,3 40,1	1,84 1,89	40,3 38,8	1,18 1,47	2,62 2,81	0,19 0,21	3,39 3,84	0,24 0,38	3 3	 x	x

Tabelle 7c: Mittlere Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit
nach stationärer Klimaeinwirkung

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Zylinderdruckfestigkeit				Spaltzugfestigkeit				Proben- anzahl N	Prüf- temperatur	
					Quarkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarkieszuschlag		Kalksteinzuschlag			warm	kalt
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_C$ [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_C$ [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_{SZ}$ [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]	Mittel- wert $\bar{\sigma}_{SZ}$ [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]			
FV17	20°C/65% r.F.	150	-	-	51,6	1,41	-	-	4,05	0,42	-	-	3		x
		150	20°C/65% r.F.	120	52,0	1,71	-	-	4,20	0,19	-	-	3		x
F17	20°C/65% r.F.	150	95°C/65% r.F.	30	49,0	2,18	-	-	3,29	0,28	-	-	5		x
				60	47,0	1,55	-	-	3,22	0,15	-	-	5		x
				90	53,7	3,13	-	-	3,43	0,33	-	-	5		x
				120	56,8	1,87	-	-	3,11	0,30	-	-	5		x
FV18	20°C/95% r.F.	150	-	-	44,1	2,06	-	-	3,60	0,14	-	-	3		x
		150	20°C/95% r.F.	120	42,5	1,05	-	-	3,77	0,26	-	-	3		x
F18	20°C/95% r.F.	150	95°C/95% r.F.	30	39,3	0,99	-	-	3,50	0,25	-	-	5		x
				60	39,8	0,56	-	-	3,42	0,22	-	-	5		x
				90	40,8	1,87	-	-	3,05	0,19	-	-	5		x
				120	40,4	2,00	-	-	3,16	0,41	-	-	5		x

**Tabelle 8a: Mittlere Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit
nach zyklischer Klimaeinwirkung**

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Zylinderdruckfestigkeit				Spaltzugfestigkeit				Proben- anzahl N	Prüf- temperatur	
					Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag				
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	Mittel- wert \bar{f}_C [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert \bar{f}_C [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert \bar{f}_{SZ} [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert \bar{f}_{SZ} [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]		warm	kalt
F1,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	40,3	1,77	38,2	0,74	3,23	0,19	3,84	0,12	3		x
F2,Z		150		1 Zyklus = 14d	45,6	1,98	39,9	2,10	3,71	0,29	4,31	0,22	3		x
				3 Zyklen je 14d = 42d	44,4	2,07	38,4	2,55	3,47	0,07	4,17	0,25	3		x
				8 Zyklen je 14d = 112d	42,5	1,92	36,6	1,29	3,12	0,21	3,76	0,09	3		x
F5,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 42d = 42d	43,1	0,74	38,6	0,62	3,05	0,17	4,00	0,12	3		x
F6,Z	150	1 Zyklus = 14d		46,4	0,99	-	-	3,70	0,33	-	-	3		x	
		3 Zyklen je 14d = 42d		43,4	2,05	-	-	3,34	0,14	-	-	3		x	
		8 Zyklen je 14d = 112d		42,0	0,87	-	-	3,56	0,28	-	-	3		x	

**Tabelle 8b: Mittlere Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit
nach zyklischer Klimaeinwirkung**

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Zylinderdruckfestigkeit				Spaltzugfestigkeit				Proben- anzahl N	Prüf- temperatur	
					Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag			warm	kalt
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	Mittel- wert \bar{f}_C [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]	Mittel- wert \bar{f}_C [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]	Mittel- wert \bar{f}_{SZ} [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]	Mittel- wert \bar{f}_{SZ} [N/mm ²]	Standard- abweichung s [N/mm ²]			
F9,Z	20°C/65% r.F.	40	95°C/☁ und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	42,8	2,41	39,7	1,12	2,83	0,16	3,23	0,20	3		x
F10,Z		150		1 Zyklus = 14d	50,2	2,05	40,8	3,67	4,35	0,33	3,72	0,37	3		x
				3 Zyklen je 14d = 42d	45,7	1,11	39,6	3,17	3,98	0,19	3,44	0,13	3		x
				8 Zyklen je 14d = 112d	42,7	1,63	37,8	2,19	3,75	0,25	3,34	0,19	3		x
F13,Z	20°C/65% r.F.	40	95°C/☁ 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	36,9	1,77	28,8	1,63	3,57	0,16	3,98	0,06	3		x
F14,Z				1 Zyklus = 14d	40,6	2,01	-	-	4,57	0,24	-	-	3		x
				3 Zyklen je 14d = 42d	41,0	1,89	-	-	4,42	0,31	-	-	3		x
				8 Zyklen je 14d = 112d	40,6	2,15	-	-	3,72	0,24	-	-	3		x

Tabelle 8c: Mittlere Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit
nach zyklischer Klimaeinwirkung

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Zylinderdruckfestigkeit				Spaltzugfestigkeit				Proben- anzahl N	Prüf- temperatur	
					Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag				
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	Mittel- wert \bar{B}_C [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert \bar{B}_C [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert \bar{B}_{SZ} [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]	Mittel- wert \bar{B}_{SZ} [N/mm²]	Standard- abweichung s [N/mm²]		warm	kalt
F17,Z	20°C/65% r.F.	150	95°C/65% r.F. und 20°C/65% r.F.	1 Zyklus = 28d	46,4	2,98			4,41	0,37			4		x
				2 Zyklen je 28d = 56d	45,5	3,64			4,23	0,19			4		x
				3 Zyklen je 28d = 84d	45,1	1,14			3,93	0,22			4		x
				4 Zyklen je 28d = 112d	43,1	1,77			3,84	0,27			4		x
				5 Zyklen je 28d = 140d	45,8	2,03			3,86	0,31			4		x
F18,Z	20°C/95% r.F.	150	95°C/95% r.F. und 20°C/65% r.F.	1 Zyklus = 28d	43,5	1,79			3,85	0,29			4		x
				2 Zyklen je 28d = 56d	40,2	2,01			3,73	0,30			4		x
				3 Zyklen je 28d = 84d	40,5	1,82			3,74	0,18			4		x
				4 Zyklen je 28d = 112d	35,4	2,54			3,44	0,14			4		x
				5 Zyklen je 28d = 140d	34,9	2,44			3,33	0,20			4		x

Tabelle 9a: Veränderung von Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit durch stationäre Klimaeinwirkung gegenüber Lagerung bei 20°C/65%r.F.







Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Prüf-temperatur		Bezugs-serie	mittlere bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\bar{\beta}'_C = \frac{\bar{\beta}_C(T/\varphi)}{\bar{\beta}_C(20/65)}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{\beta}'_{SZ} = \frac{\bar{\beta}_{SZ}(T/\varphi)}{\bar{\beta}_{SZ}(20/65)}$			
								Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm	kalt		$\bar{\beta}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\beta}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\beta}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\beta}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?
F1	20°C/ 	40	95°C/ 	40		x	FV5	0,86	ja	0,73	ja	0,90	nein	1,05	nein
F3		40		x		FV5	0,85	ja	0,66	ja	1,03	nein	0,89	nein	
F2		150		40		x	FV6	0,80	ja	0,70	ja	0,79	nein	0,85	nein
				80		x	FV6	0,80	ja	0,72	ja	0,76	ja	0,77	ja
F4		150		120		x	FV6	0,76	ja	0,68	ja	0,76	ja	0,80	ja
	120		x		FV6	0,67	ja	0,64	ja	0,75	ja	0,74	ja		
F5	20°C/ 	40	95°C/ 	40		x	FV5	0,75	ja	0,75	ja	0,86	nein	0,98	nein
F6		150		40		x	FV6	0,77	ja	-	-	0,87	nein	-	-
		80			x	FV6	0,81	ja	-	-	0,85	ja	-	-	
		120			x	FV6	0,77	ja	-	-	0,92	nein	-	-	
F7	20°C/ 	40	95°C/0	40		x	FV5	0,86	ja	0,85	ja	1,01	nein	0,86	nein
F8		40		x		FV5	0,88	ja	0,83	ja	1,17	nein	1,03	nein	
F9	20°C/65% r.F.	40	95°C/ 	40		x	FV1	0,86	ja	0,67	ja	0,80	ja	0,64	ja
F11		40		x		FV1	0,80	ja	0,60	ja	1,00	nein	0,64	ja	
F10		150		40		x	FV2	0,86	ja	0,67	ja	0,84	nein	0,72	ja
				80		x	FV2	0,85	ja	0,70	ja	0,80	ja	0,69	ja
F12		150		120		x	FV2	0,90	nein	0,68	ja	0,87	nein	0,79	ja
				120	x		FV2	0,79	ja	0,62	ja	0,82	ja	0,85	nein

Tabelle 9b: Veränderung von Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit durch stationäre Klimaeinwirkung gegenüber Lagerung bei 20°C/65%r.F.


Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Prüf-temperatur		Bezugs-serie	mittlere bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\bar{\sigma}_C' = \frac{\bar{\sigma}_C(T/\psi)}{\bar{\sigma}_C(20/65)}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{\sigma}_{SZ}' = \frac{\bar{\sigma}_{SZ}(T/\psi)}{\bar{\sigma}_{SZ}(20/65)}$			
								Quarzkieszuschlag Kalksteinzuschlag				Quarzkieszuschlag Kalksteinzuschlag			
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm	kalt		$\bar{\sigma}_C' [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}_C' [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}_{SZ}' [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}_{SZ}' [-]$	Effekt signi-fikant?
F13	20°C/65% r.F.	40	95°C/ 	40		x	FV1	0,82	ja	0,71	ja	1,03	nein	0,77	ja
F14		150		40		x	FV2	0,80	ja	-	-	0,90	nein	-	-
		80			x	FV2	0,85	ja	-	-	0,89	nein	-	-	
		120			x	FV2	0,84	ja	-	-	1,01	nein	-	-	
F15	20°C/65% r.F.	40	95°C/o	40		x	FV1	0,88	ja	0,85	ja	0,85	ja	0,74	ja
F16		40		40	x		FV1	0,80	ja	0,82	ja	0,91	nein	0,83	nein
F17	20°C/65% r.F.	150	95°C/65% r.F.	30		x	FV17	0,95	nein	-	-	0,78	ja	-	-
				60		x	FV17	0,94	ja	-	-	0,77	ja	-	-
				90		x	FV17	1,04	nein	-	-	0,82	ja	-	-
				120		x	FV17	1,10	ja	-	-	0,74	nein	-	-
F18	20°C/95% r.F.	150	95°C/95% r.F.	30		x	FV17	0,90	ja	-	-	0,93	nein	-	-
				60		x	FV17	0,92	nein	-	-	0,91	nein	-	-
				90		x	FV17	0,95	nein	-	-	0,81	ja	-	-
				120		x	FV17	0,95	nein	-	-	0,84	ja	-	-

Tabelle 10a: Veränderung von Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit durch zyklische Klimaeinwirkung gegenüber Lagerung bei 20°C/65%r.F.





Serie	Vorlagerung Betriebsbedingung Prüf-temperatur						Bezugs- serie	mittlere bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\bar{B}'_C = \frac{\bar{B}_C(T/\varphi)}{\bar{B}_C(20/65)}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{B}'_{SZ} = \frac{\bar{B}_{SZ}(T/\varphi)}{\bar{B}_{SZ}(20/65)}$			
								Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm	kalt		$\bar{B}'_C [-]$	Effekt signi- fikant?	$\bar{B}'_C [-]$	Effekt signi- fikant?	$\bar{B}'_{SZ} [-]$	Effekt signi- fikant?	$\bar{B}'_{SZ} [-]$	Effekt signi- fikant?
F1,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d		x	FV5	0,79	ja	0,79	ja	1,04	nein	0,95	nein
		150		1 Zyklus = 14d		x	FV6	0,90	nein	0,84	ja	0,95	nein	0,92	nein
				3 Zyklen je 14d = 42d		x	FV6	0,84	ja	0,80	ja	0,86	ja	0,90	nein
				8 Zyklen je 14d = 112d		x	FV6	0,77	ja	0,74	ja	0,72	ja	0,80	ja
F5,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d		x	FV5	0,84	ja	0,80	ja	0,98	nein	0,99	nein
F6,Z		150		1 Zyklus = 14d		x	FV6	0,92	ja	-	-	0,98	nein	-	-
				3 Zyklen je 14d = 42d		x	FV6	0,82	ja	-	-	0,89	nein	-	-
				8 Zyklen je 14d = 112d		x	FV6	0,76	ja	-	-	0,82	ja	-	-

Tabelle 10b: Veränderung von Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit durch zyklische Klimaeinwirkung gegenüber Lagerung bei 20⁰ C/65%r.F.



Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Prüf-temperatur	Bezugs-serie	mittlere bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\bar{\sigma}_C(T/\varphi) = \frac{\bar{\sigma}_C(T/\varphi)}{\bar{\sigma}_C(20/65)}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{\sigma}_{SZ}(T/\varphi) = \frac{\bar{\sigma}_{SZ}(T/\varphi)}{\bar{\sigma}_{SZ}(20/65)}$			
							Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm kalt		$\bar{\sigma}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?
F9,Z	20°C/65% r.F.	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	x	FV1	0,85	ja	0,84	ja	0,92	nein	0,71	ja
F10,Z		150		1 Zyklus = 14d	x	FV2	0,99	nein	0,86	nein	0,97	nein	0,83	nein
				3 Zyklen je 14d = 42d	x	FV2	0,89	ja	0,83	ja	0,90	nein	0,80	ja
				8 Zyklen je 14d = 112d	x	FV2	0,81	ja	0,78	ja	0,88	nein	0,74	ja
F13,Z	20°C/65% r.F.	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	x	FV1	0,73	ja	0,59	ja	1,16	ja	0,86	ja
F14,Z		150		1 Zyklus = 14d	x	FV2	0,85	ja	-	-	1,02	nein	-	-
				3 Zyklen je 14d = 42d	x	FV2	0,80	ja	-	-	1,00	nein	-	-
				8 Zyklen je 14d = 112d	x	FV2	0,77	ja	-	-	0,87	nein	-	-

Tabelle 10c: Veränderung von Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit durch zyklische Klimaeinwirkung gegenüber Lagerung bei 20°C/65%r.F.

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Prüf-temperatur		Bezugs-serie	mittlere bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\bar{\sigma}_C(T/\varphi) = \frac{\bar{\sigma}_C(20/65)}{\bar{\sigma}_C(20/65)}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{\sigma}_{SZ}(T/\varphi) = \frac{\bar{\sigma}_{SZ}(20/65)}{\bar{\sigma}_{SZ}(20/65)}$			
								Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm	kalt		$\bar{\sigma}_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?
F17,Z	20°C/65% r.F.	150	95°C/65% r.F. und 20°C/65% r.F.	1 Zyklus = 28d		x	FV17	0,90	nein			1,08	nein		
				2 Zyklen je 28d = 56d		x	FV17	0,88	nein			1,03	nein		
				3 Zyklen je 28d = 84d		x	FV17	0,87	ja			0,95	nein		
				4 Zyklen je 28d = 112d		x	FV17	0,83	ja			0,92	nein		
				5 Zyklen je 28d = 140d		x	FV17	0,88	ja			0,92	nein		
F18,Z	20°C/95% r.F.	150	95°C/95% r.F. und 20°C/65% r.F.	1 Zyklus = 28d		x	FV18	0,98	nein			1,05	nein		
				2 Zyklen je 28d = 56d		x	FV18	0,90	ja			1,00	nein		
				3 Zyklen je 28d = 84d		x	FV18	0,90	ja			0,98	nein		
				4 Zyklen je 28d = 112d		x	FV18	0,84	ja			0,90	ja		
				5 Zyklen je 28d = 140d		x	FV18	0,82	ja			0,84	ja		

Tabelle 11: Einfluß erhöhter Temperatur auf Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit bei Verhinderung von Trocknung





Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Prüf-temperatur		Bezugs-serie	mittlere bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\bar{b}'_C = \frac{\bar{b}_C(T/\varphi)}{\bar{b}_C(20/(\infty))}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{b}'_{SZ} = \frac{\bar{b}_{SZ}(T/\varphi)}{\bar{b}_{SZ}(20/(\infty))}$			
								Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm	kalt		$\bar{b}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{b}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{b}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{b}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?
F1	20°C/ 	40	95°C/ 	40		x	FV3	0,99	nein	0,78	ja	0,99	nein	1,05	nein
F3		40		40	x		FV3	0,98	nein	0,71	ja	1,13	nein	0,89	nein
F2		150		40		x	FW4	0,85	ja	0,73	ja	0,81	nein	0,99	nein
				80		x	FV4	0,89	ja	0,75	ja	0,82	ja	0,80	ja
F4				120		x	FV4	0,90	ja	0,71	ja	0,84	nein	0,76	ja
	150	120	x	FV4	0,79	ja	0,68	ja	0,83	ja	0,74	ja			
F5	20°C/ 	40	95°C/ 	40		x	FV3	0,86	ja	0,80	ja	0,95	nein	0,98	nein
F6		150		40		x	FW4	0,81	ja			0,90	nein		
				80		x	FV4	0,90	nein			0,91	nein		
				120		x	FV4	0,91	nein			1,02	nein		

Tabelle 12: Einfluß der Prüftemperatur auf Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit





Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Prüf- temperatur		Bezugs- serie	mittlere bezogene Zylinderdruck- festigkeit $\bar{\sigma}'_C = \frac{\bar{\sigma}_C(T/\varphi)_{\text{warm}}}{\bar{\sigma}_C(T/\varphi)_{\text{kalt}}}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{\sigma}'_{SZ} = \frac{\bar{\sigma}_{SZ}(T/\varphi)_{\text{warm}}}{\bar{\sigma}_{SZ}(T/\varphi)_{\text{kalt}}}$			
								Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm	kalt		$\bar{\sigma}'_C [-]$	Effekt signi- fikant?	$\bar{\sigma}'_C [-]$	Effekt signi- fikant?	$\bar{\sigma}'_{SZ} [-]$	Effekt signi- fikant?	$\bar{\sigma}'_{SZ} [-]$	Effekt signi- fikant?
F3	20°C/ 	40	95°C/ 	40	x		F1	0,99	nein	0,91	ja	1,14	nein	0,85	ja
F4		150		120	x		F2	0,88	ja	1,03	nein	0,76	ja	0,98	nein
F8	20°C/ 	40	95°C/0	40	x		F7	1,02	nein	0,97	nein	1,16	nein	1,20	ja
F11	20°C/65 r.F.	40	95°C/ 	40	x		F9	0,93	nein	0,89	ja	1,26	ja	1,01	nein
F12		150		120	x		F10	0,88	ja	0,99	nein	0,95	nein	1,07	nein
F16	20°C/65 r.F.	40	95°C/0	40	x		F15	0,91	nein	0,96	nein	1,07	nein	1,13	nein

Tabelle 13: Einfluß des Betonalters auf Zylinderdruck- und Spaltzugfestigkeit













Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Prüf-temperatur		Bezugs-serie	mittlere bezogene Zylinderdruckfestigkeit $\bar{\sigma}'_C = \frac{\bar{\sigma}_C(r_0=40d)}{\bar{\sigma}_C(r_0=150d)}$				mittlere bezogene Spaltzugfestigkeit $\bar{\sigma}'_{SZ} = \frac{\bar{\sigma}_{SZ}(r_0=40d)}{\bar{\sigma}_{SZ}(r_0=150d)}$			
								Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag		Quarzkieszuschlag		Kalksteinzuschlag	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]	warm	kalt		$\bar{\sigma}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}'_C [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?	$\bar{\sigma}'_{SZ} [-]$	Effekt signi-fikant?
F1	20°C/ 	40	95°C/ 	40		x	F2	1,08	ja	1,04	nein	1,14	nein	1,24	nein
F5	20°C/ 	40	95°C/ 	40		x	F6	0,97	nein			0,87	nein		
F9	20°C/65% r.F.	40	95°C/ 	40		x	F10	1,00	nein	1,00	nein	0,95	nein	0,89	nein
F13	20°C/65% r.F.	40	95°C/ 	40		x	F14	1,03	nein			1,14	ja		
F1,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d		x	F2,Z	0,94	nein			1,21	ja		
F5,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d		x	F6,Z	1,02	nein			1,17	ja		
F9,Z	20°C/65% r.F.	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d		x	F10,Z	0,96	ja			1,02	nein		
F13,Z	20°C/65% r.F.	40	95°C/  und 20°C/65% r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d		x	F14,Z	0,91	ja			1,16	nein		

Tabelle 14a: Elastizitätsmodul nach stationärer Klimaeinwirkung
bezogen auf Lagerung bei 20°C/65%r.F. (Sekantenmodul)










Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Proben- anzahl N	mittlerer E-Modul \bar{E}_b (N/mm ²)		Bezugs- serie	mittlerer, bezogener E-Modul $\bar{E}'_b = \frac{\bar{E}_b(T/\varphi)}{\bar{E}_b(20/65)}$	
	Art	Dauer (d)	Art	Dauer (d)		Quarkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag		Quarkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag
F1-F7 FV3-FV6 F1,2- F6,2	20°C/ 	40 150	- -	- -	2 2	35.400 37.700	36.800 37.100		- -	- -
FV3 FV4	20°C/ 	40 150	20°C/ 	40 120	2 2	31.700 33.500	37.100 34.500		- -	- -
FV5 FV6	20°C/ 	40 150	20°C/65 % r.F.	40 120	2 2	30.300 32.900	34.200 36.800		- -	- -
F1 F2	20°C/ 	40 150	95°C/ 	40 120	2 2	32.400 32.600	30.900 32.400	FV5 FV6	1,07 0,99	0,90 0,88
F5 F6	20°C/ 	40 150	95°C/ 	40 120	2 2	30.000 30.900	28.200 -	FV5 FV6	0,99 0,94	0,82 -
F7	20°C/ 	40	95°C/0	40	2	24.800	27.00	FV5	0,82	0,79

Tabelle 14b: Elastizitätsmodul nach stationärer Klimaeinwirkung
bezogen auf Lagerung bei 20°C/65%r.F. (Sekantenmodul)

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Proben- anzahl N	mittlerer E-Modul \bar{E}_b (N/mm ²)		Bezugs- serie	mittlerer, bezogener E-Modul $\bar{E}'_b = \frac{\bar{E}_b(T/\varphi)}{\bar{E}_b(20/65)}$	
	Art	Dauer (d)	Art	Dauer (d)		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag
F9-F16 FV1u.2	20°C/65 % r.F.	40	-	-	2	30.000	35.500		-	-
F9,Z- F14,Z		150	-	-	2	30.100	32.500		-	-
FV1	20°C/65 % r.F.	40	20°C/65 % r.F.	40	2	30.400	32.800		-	-
FV2		150		120	2	33.400	33.000		-	-
F9	20°C/65 % r.F.	40	95°C/☐	40	2	29.500	27.500	FV1	0,97	0,84
F10		150		120	2	31.700	28.100	FV2	0,95	0,85
F13	20°C/65 % r.F.	40	95°C/☐	40	2	27.700	24.600	FV1	0,91	0,75
F14		150		120	2	30.500	-	FV2	0,91	-
F15	20°C/65 % r.F.	40	95°C/0	40	2	23.100	23.600	FV1	0,76	0,72

Tabelle 14c: Elastizitätsmodul nach stationärer Klimaeinwirkung
bezogen auf Lagerung bei 20°C/65%r.F. (Sekantenmodul)

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Proben- anzahl N	mittlerer E-Modul \bar{E}_b [N/mm ²]		Bezugs- serie	mittlerer, bezogener E-Modul $\bar{E}'_b = \frac{\bar{E}_b(T/\psi)}{\bar{E}_b(20/65)}$	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag
FV17	20°C/65 % r.F.	150	-	-	2	23.200	-		-	-
			20°C/65 % r.F.	120	2	23.500	-		-	-
F17	20°C/65 % r.F.	150	95°C/65 % r.F.	30	2	20.500	-	FV17	0,88	-
				60	2	19.100	-	FV17	0,82	-
				90	2	19.500	-	FV17	0,84	-
				120	2	21.400	-	FV17	0,91	-
FV18	20°C/95 % r.F.	150	-	-	2	25.700	-		-	-
			20°C/95 % r.F.	120	2	26.800	-		-	-
F18	20°C/95 % r.F.	150	95°C/95 % r.F.	30	2	22.600	-	FV18	0,87	-
				60	2	24.600	-	FV18	0,94	-
				90	2	25.200	-	FV18	0,95	-
				120	2	25.200	-	FV18	0,95	-

Tabelle 15a: Elastizitätsmodul nach zyklischer Klimaeinwirkung
bezogen auf Lagerung bei 20°C/65%r.F. (Sekantenmodul)






Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Proben- anzahl N	mittlerer E-Modul \bar{E}_b (N/mm ²)		Bezugs- serie	mittlerer, bezogener E-Modul $\bar{E}'_b = \frac{\bar{E}_b(t/\varphi)}{\bar{E}_b(20/65)}$	
	Art	Dauer (d)	Art	Dauer (d)		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag
F1,Z F2,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65%r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	2	30.000	30.100	FV5	0,99	0,88
		150		1 Zyklus = 14d	2	36.300	32.600	FV6	0,98	0,88
				3 Zyklen je 14d = 42d	2	32.400	31.100	FV6	0,90	0,84
				8 Zyklen je 14d = 112d	2	29.900	30.200	FV6	0,90	0,82
F5,Z F6,Z	20°C/ 	40	95°C/  und 20°C/65%r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	2	28.800	29.100	FV5	0,95	0,85
		150		1 Zyklus = 14d	2	35.200	-	FV6	0,95	-
				3 Zyklen je 14d = 42d	2	32.000	-	FV6	0,89	-
				8 Zyklen je 14d = 112d	2	28.600	-	FV6	0,86	-
F9,Z F10,Z	20°C/65 % r.F.	40	95°C/  und 20°C/65%r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	2	27.700	32.800	FV1	0,91	1,00
		150		1 Zyklus = 14d	2	28.700	30.300	FV2	0,94	0,93
				3 Zyklen je 14d = 42d	2	29.400	31.100	FV2	0,94	0,95
				8 Zyklen je 14d = 112d	2	28.900	27.900	FV2	0,87	0,85

Tabelle 15b: Elastizitätsmodul nach zyklischer Klimaeinwirkung
bezogen auf Lagerung bei 20°C/65%r.F. (Sekantenmodul)

Serie	Vorlagerung		Betriebsbedingung		Proben- anzahl N	mittlerer E-Modul \bar{E}_b [N/mm ²]		Bezugs- serie	mittlerer, bezogener E-Modul $\bar{E}_b' = \frac{\bar{E}_b(T/\varphi)}{\bar{E}_b(20/65)}$	
	Art	Dauer [d]	Art	Dauer [d]		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag		Quarzkies- zuschlag	Kalkstein- zuschlag
F13,Z	20°C/65 % r.F.	40	95°C/95%r.F. und 20°C/65%r.F.	3 Zyklen je 14d = 42d	2	27.400	30.200	FV1	0,90	0,92
F14,Z		150		1 Zyklus = 14d	2	29.000	-	FV2	0,95	-
				3 Zyklen je 14d = 42d	2	28.200	-	FV2	0,90	-
				8 Zyklen je 14d = 112d	2	28.600	-	FV2	0,86	-
F17,Z	20°C/65 % r.F.	150	95°C/65%r.F.u. 20°C/65%r.F.	1 Zyklus = 28d	2	21.200	-	FV17	0,91	-
				3 Zyklen je 28d = 84d	2	19.400	-	FV17	0,83	-
				5 Zyklen je 28d = 140d	2	18.800	-	FV17	0,80	-
F18,Z	20°C/95 % r.F.	150	95°C/95%r.F.u. 20°C/65%r.F.	1 Zyklus = 28d	2	22.400	-	FV18	0,86	-
				3 Zyklen je 28d = 84d	2	22.800	-	FV18	0,86	-
				5 Zyklen je 28d = 140d	2	22.000	-	FV18	0,82	-

Tabelle 16: Kriechzahlen nach 40-tägiger Belastung φ_{40d}^*





Serie	Zuschlag	Klima	φ_{40d}^*	$\frac{\varphi_{40d}^*(95^\circ\text{C})}{\varphi_{40d}^*(20^\circ\text{C})}$	$\frac{\varphi_{40d}^*(95^\circ\text{C;Bel.z.B})}{\varphi_{40d}^*(95^\circ\text{C;Bel.z.A})}$
K1,A	Quarzk.	95°C/ 	1,72	2,97	
	Kalkst.		1,92	2,56	
K2,A	Quarzk.	95°C/65%r.F.	1,88	2,41	
	Kalkst.		2,27	2,29	
K2,B	Quarzk.	95°C/65%r.F.	2,63	3,37	1,40
K3,A	Quarzk.	95°C/95%r.F.	2,18	3,14	
	Kalkst.		2,46	3,28	
K3,B	Quarzk.	95°C/95%r.F.	2,74	4,28	1,26
K3,Z	Quarzk.	Zyklen	2,83	4,42	1,41
	Kalkst.	95°C/95%r.F. +20°C/95%r.F.	3,02	4,03	1,23
KV1	Quarzk.	20°C/ 	0,58		
	Kalkst.		0,75		
KV2	Quarzk.	20°C/65%r.F.	0,78		
	Kalkst.		0,99		
KV3	Quarzk.	20°C/95%r.F.	0,64		
	Kalkst.		0,75		

Tabelle 17: Endkriechzahlen φ_{∞}^* (Ross-Extrapolation)

Serie	Zuschlag	Klima	φ_{∞}^*	$\frac{\varphi_{\infty}^*(95^{\circ}\text{C})}{\varphi_{\infty}^*(20^{\circ}\text{C})}$	$\frac{\varphi_{\infty}^*(95^{\circ}\text{C; Belz. B})}{\varphi_{\infty}^*(95^{\circ}\text{C; Belz. B})}$
K1,A	Quarzk.	95°C/ 	3,15	3,66	
	Kalkst.		3,01	2,92	
K2,A	Quarzk.	95°C/65%r.F.	2,08	2,31	
	Kalkst.		2,59	2,49	
K2,B	Quarzk.	95°C/65%r.F.	3,09	3,43	1,48
K3,A	Quarzk.	95°C/95%r.F.	2,57	1,78	
	Kalkst.		3,24	3,68	
K3,B	Quarzk.	95°C/95%r.F.	3,36	2,33	1,31
K3,Z	Quarzk.	Zyklen	3,22	2,24	1,25
	Kalkst.	95°C/95%r.F. +20°C/95%r.F.	3,89	4,42	1,20
KV1	Quarzk.	20°C/ 	0,86		
	Kalkst.		1,03		
KV2	Quarzk.	20°C/65%r.F.	0,90		
	Kalkst.		1,04		
KV3	Quarzk.	20°C/95%r.F.	1,44		
	Kalkst.		0,88		

Abbildungen

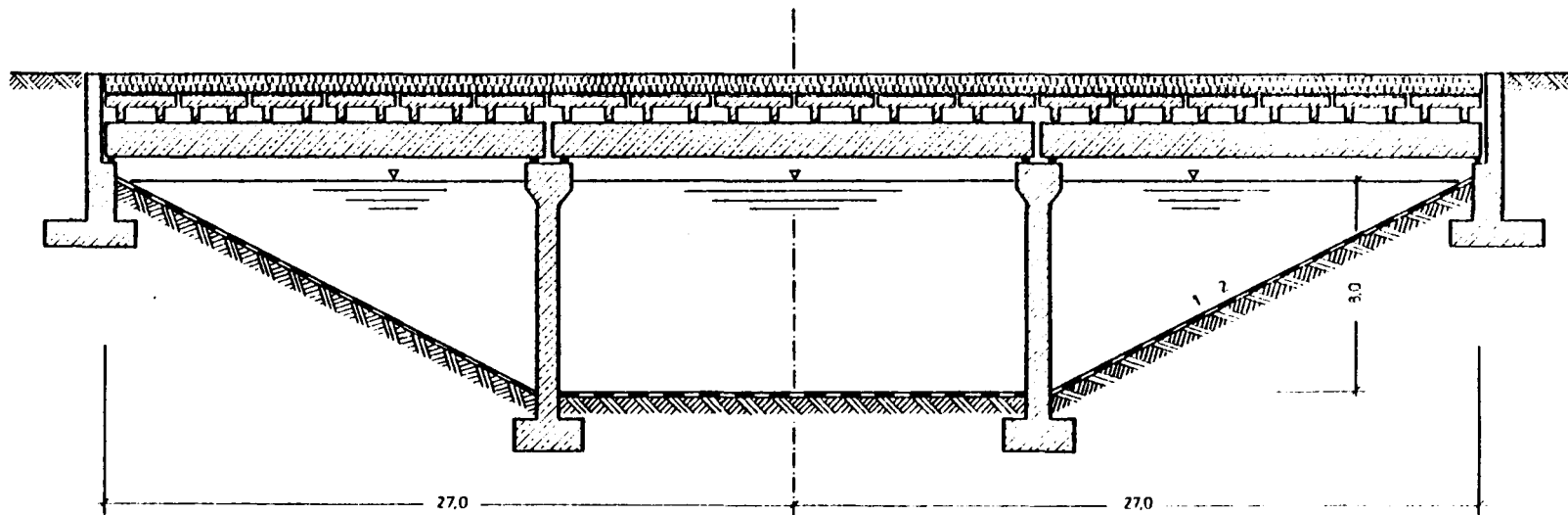
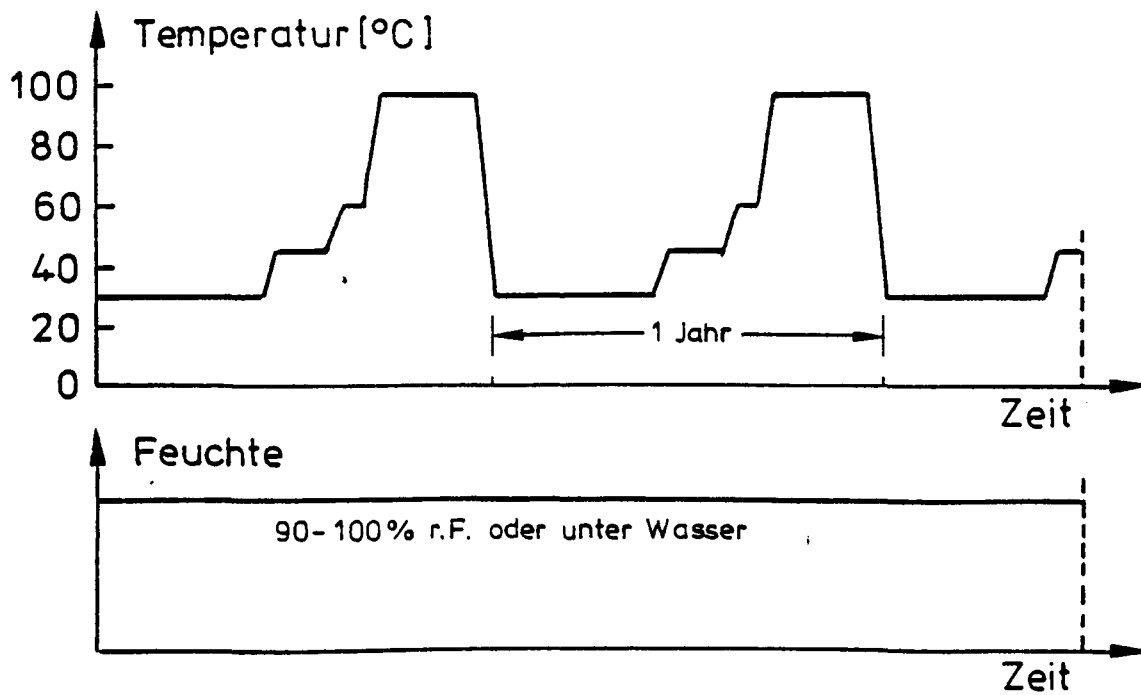
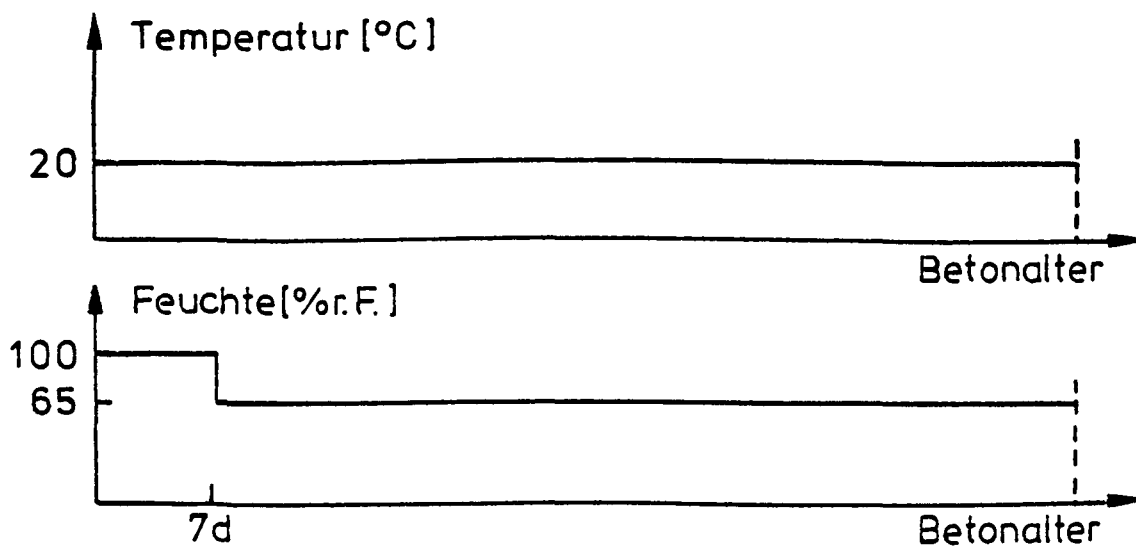


Abb. 1: Querschnittsskizze eines Langzeitwärmespeichers (Prinzipbild)

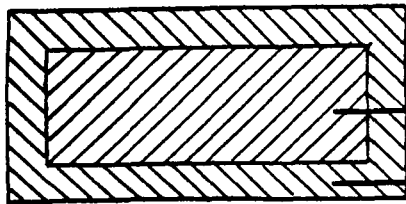


Betriebsklima Langzeitwärmespeicher



Normklima nach DIN 1045 und 4227

Abb. 2: Klimabedingungen im Langzeitwärmespeicher und nach Norm



Bauteilquerschnitt (z.B. Stütze)

Innenbereich

Randbereich

	Randbereiche	Innenbereiche
Vorlagerung	<p>trocknen bis Gleichgewicht mit Umgebungsluft</p> <p>≈ 20°C bei unterschiedlichen Feuchten</p>	<p>bleiben feucht</p> <p>≈ Wasserlagerung bei 20°C oder Verhinderung von Feuchteänderungen durch Versiegelung</p>
Betrieb	<p>folgen Temperaturänderungen rasch, Feuchteaustausch mit Umgebungsluft (i.w. atmosph. Druck)</p> <p>≈ erhöhte Temperatur bis 95°C bei unterschiedlichen Feuchten</p>	<p>folgen Temperaturänderungen träge verzögerte Feuchtebewegung (temporäre Druckerhöhung)</p> <p>≈ erhöhte Temperatur bis 95°C ohne Feuchteänderung, also unter Wasser oder Drucktopf</p>

Abb. 3: Klimabedingung in Bauteilbereichen

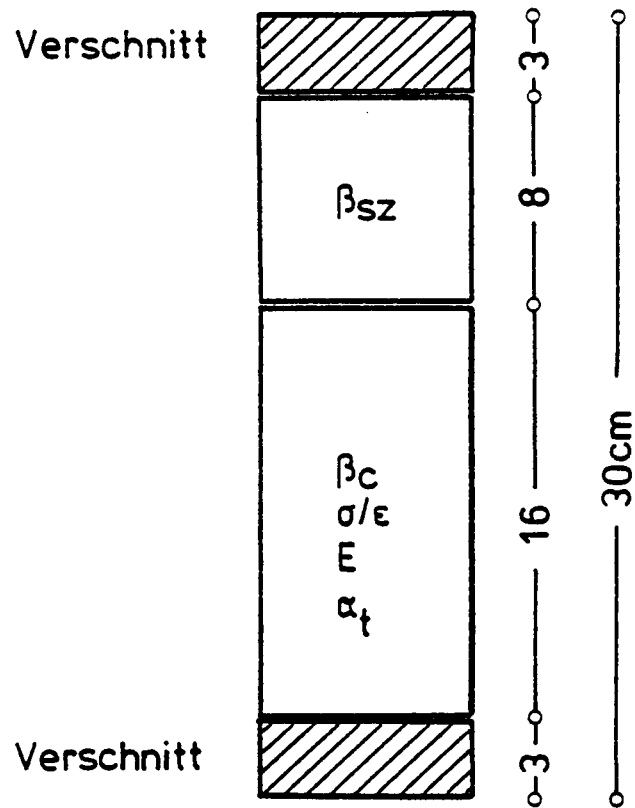


Abb. 4: Zerteilung der Zylinder 8cm/30cm



Abb. 5: Schalung für Betonhohl-
zylinder
($d_i = 5\text{cm}$, $d_a = 15\text{cm}$)

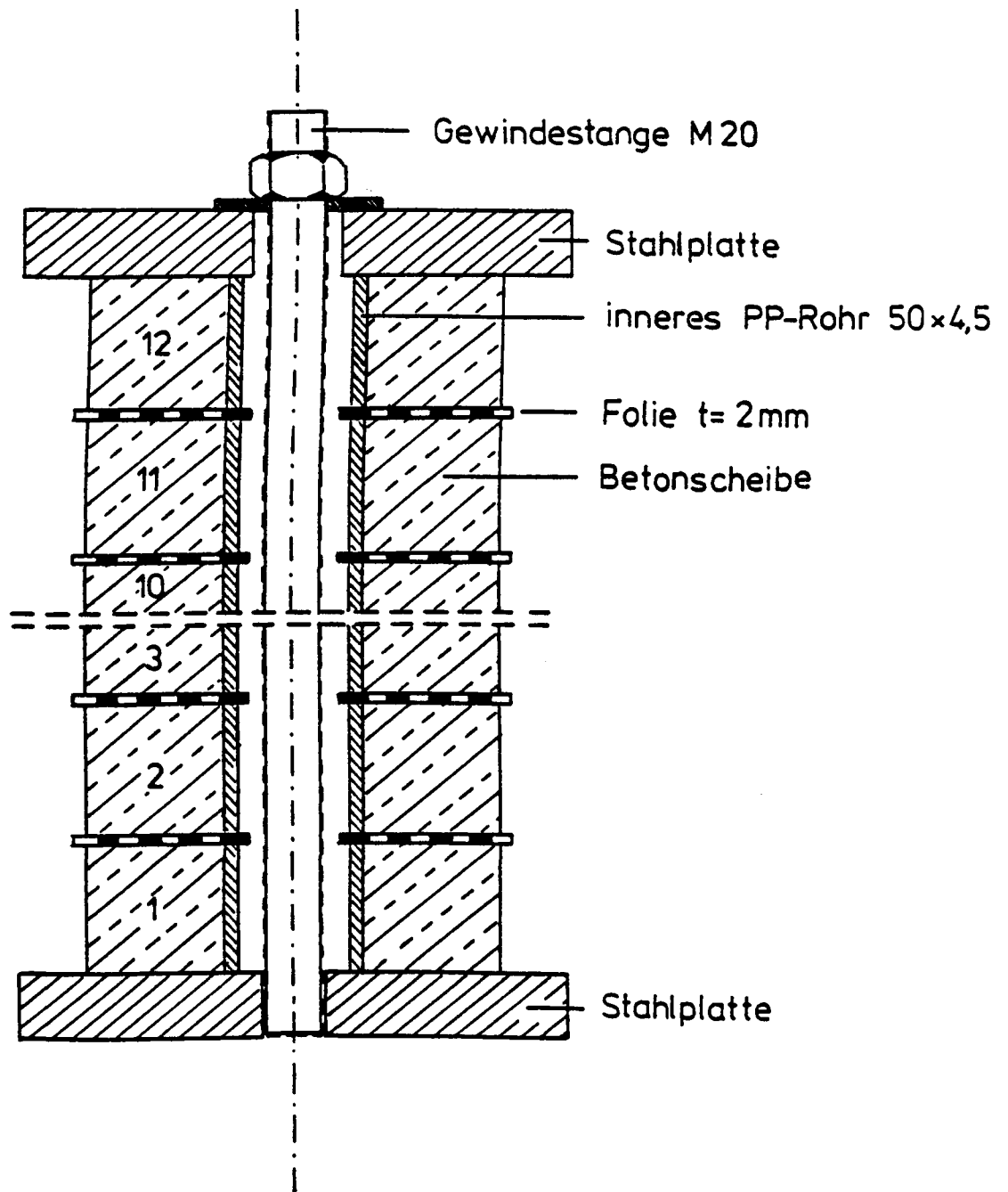


Abb. 6: Vertikalschnitt durch ein Scheibenpaket zur Ermittlung der Betonfeuchte

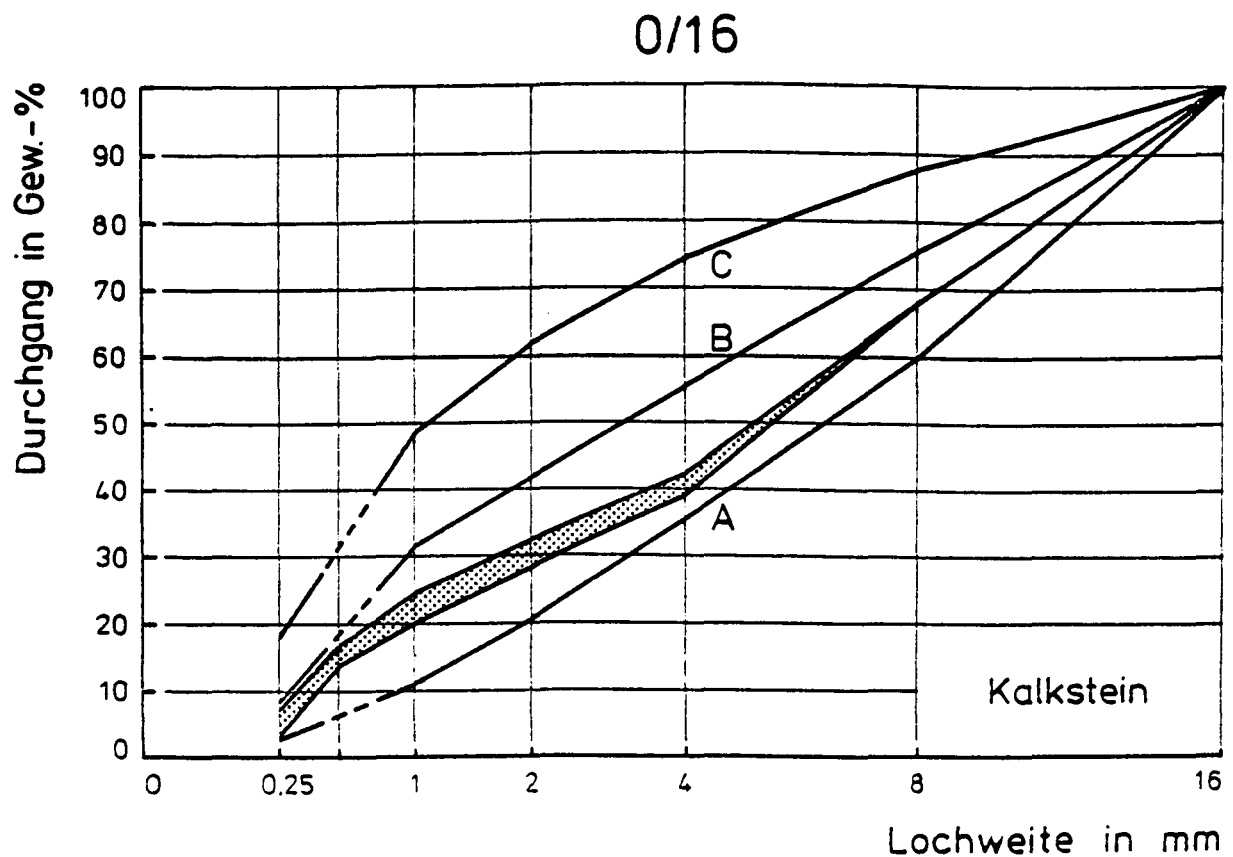
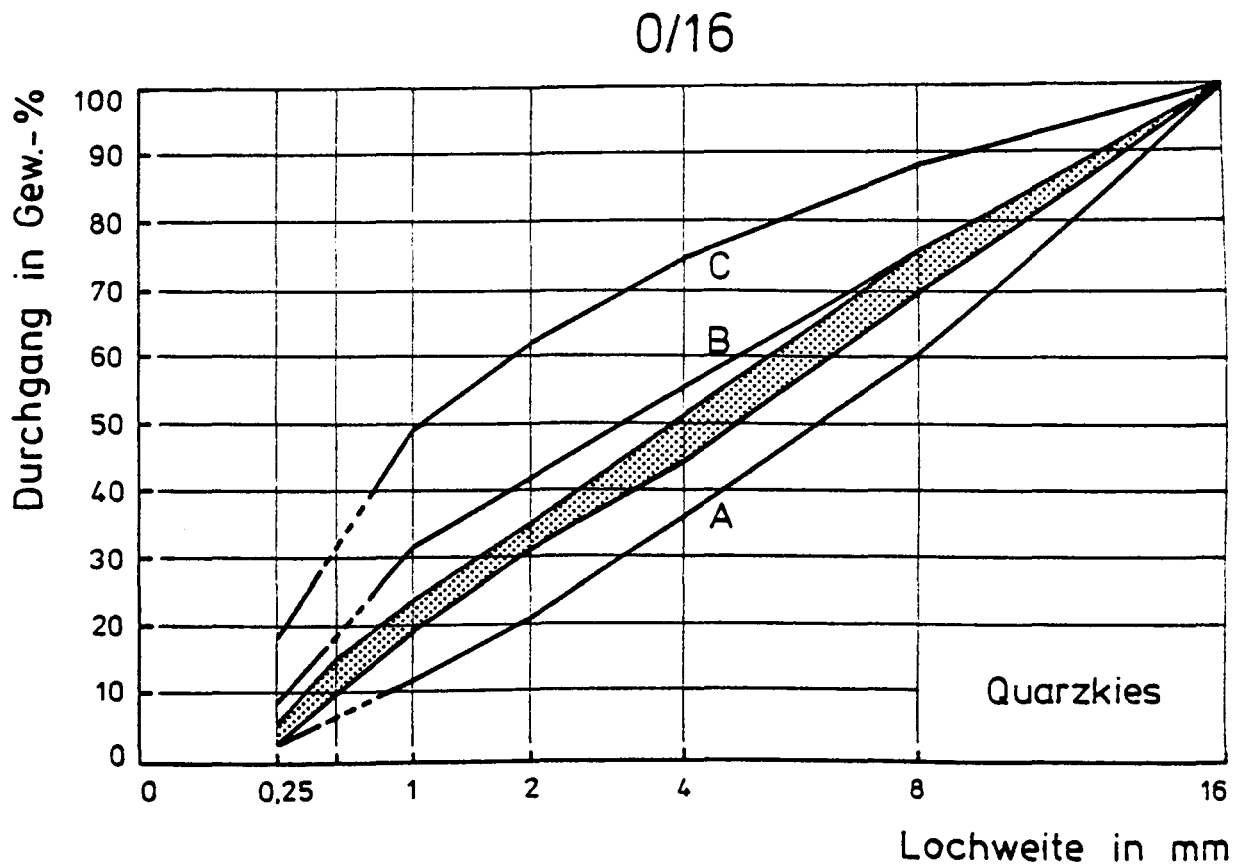


Abb. 7: Sieblinienbereiche der Verwendeten Betone



Abb. 8: Drucktöpfe

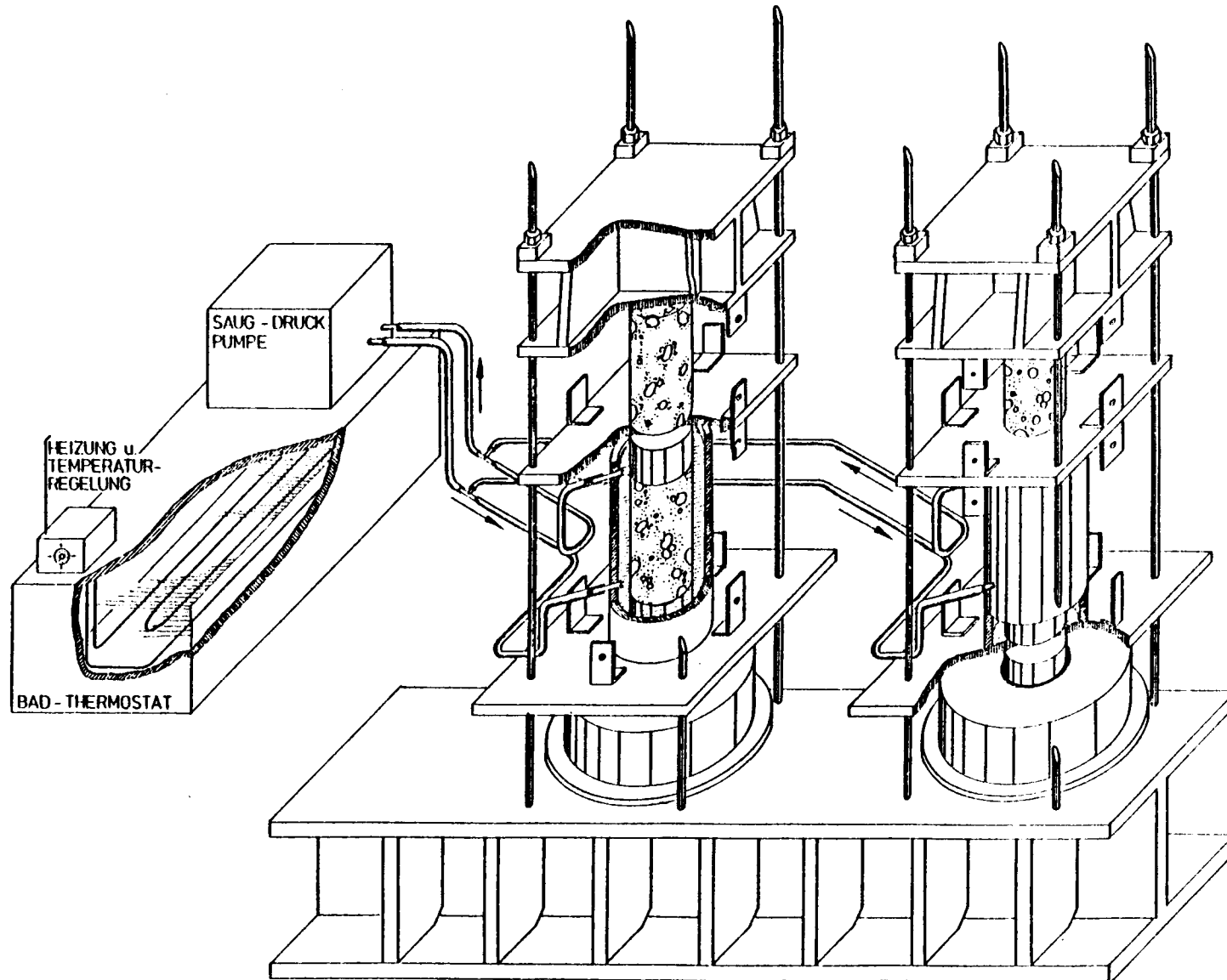
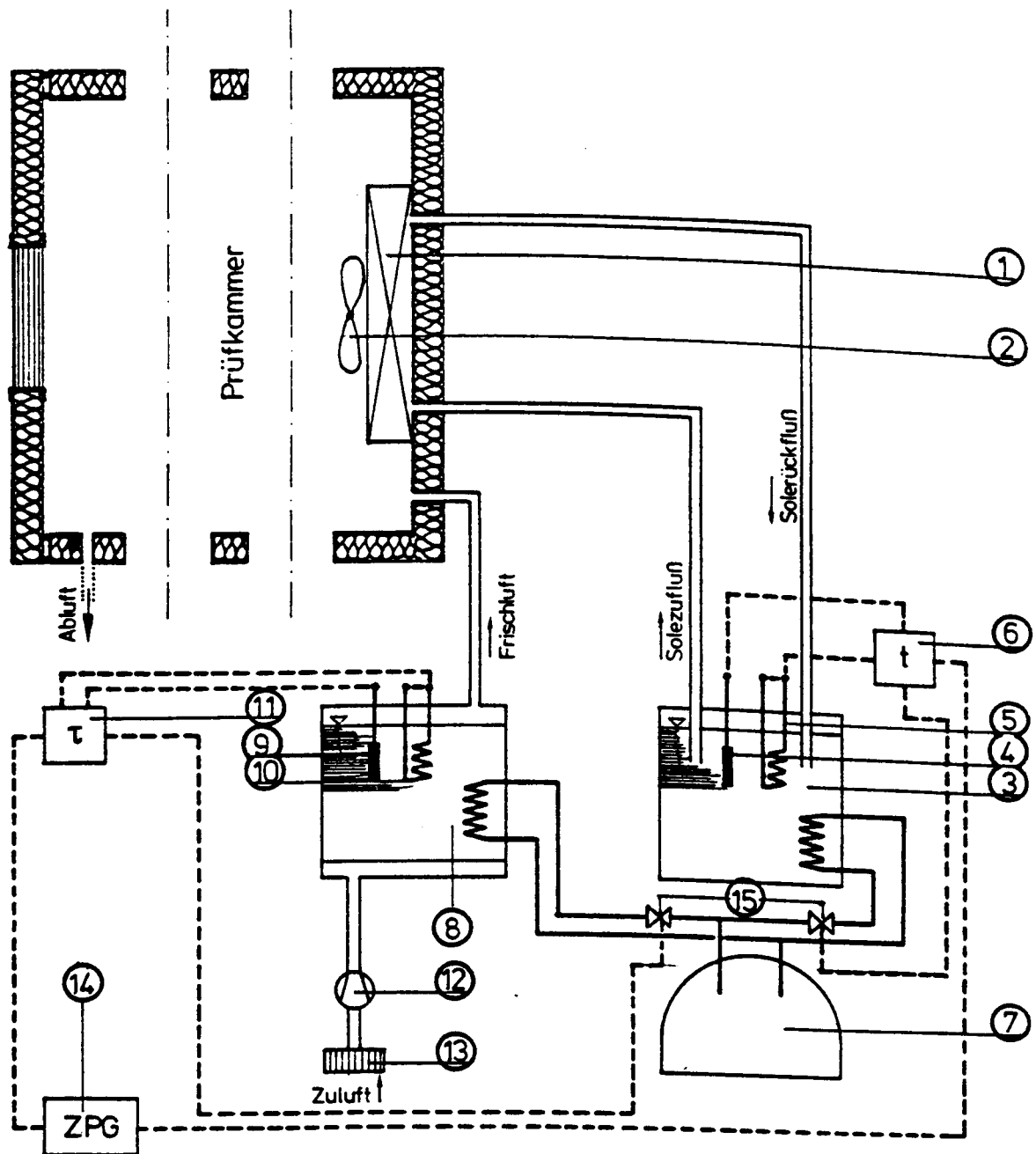


Abb. 9: Kriechversuchsstand für wassergelagerte Proben bei 95°C



- | | | |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 Wärmetauscher | 6 Soletemperaturregler | 11 Taupunkttemperatur- |
| 2 Ventilator | 7 Kälteaggregat | regler |
| 3 Solebad | 8 Taupunkt-Wasserbad | 12 Luftpumpe |
| 4 Soletemperaturfühler | 9 Taupunkttemperatur- | 13 Luftfilter |
| 5 Soleheizung | fühler | 14 Zeit-Programmgeber |
| | 10 Heizung | 15 Magnetventile |

Abb. 10: Prinzipskizze der Klimatisierungseinrichtung

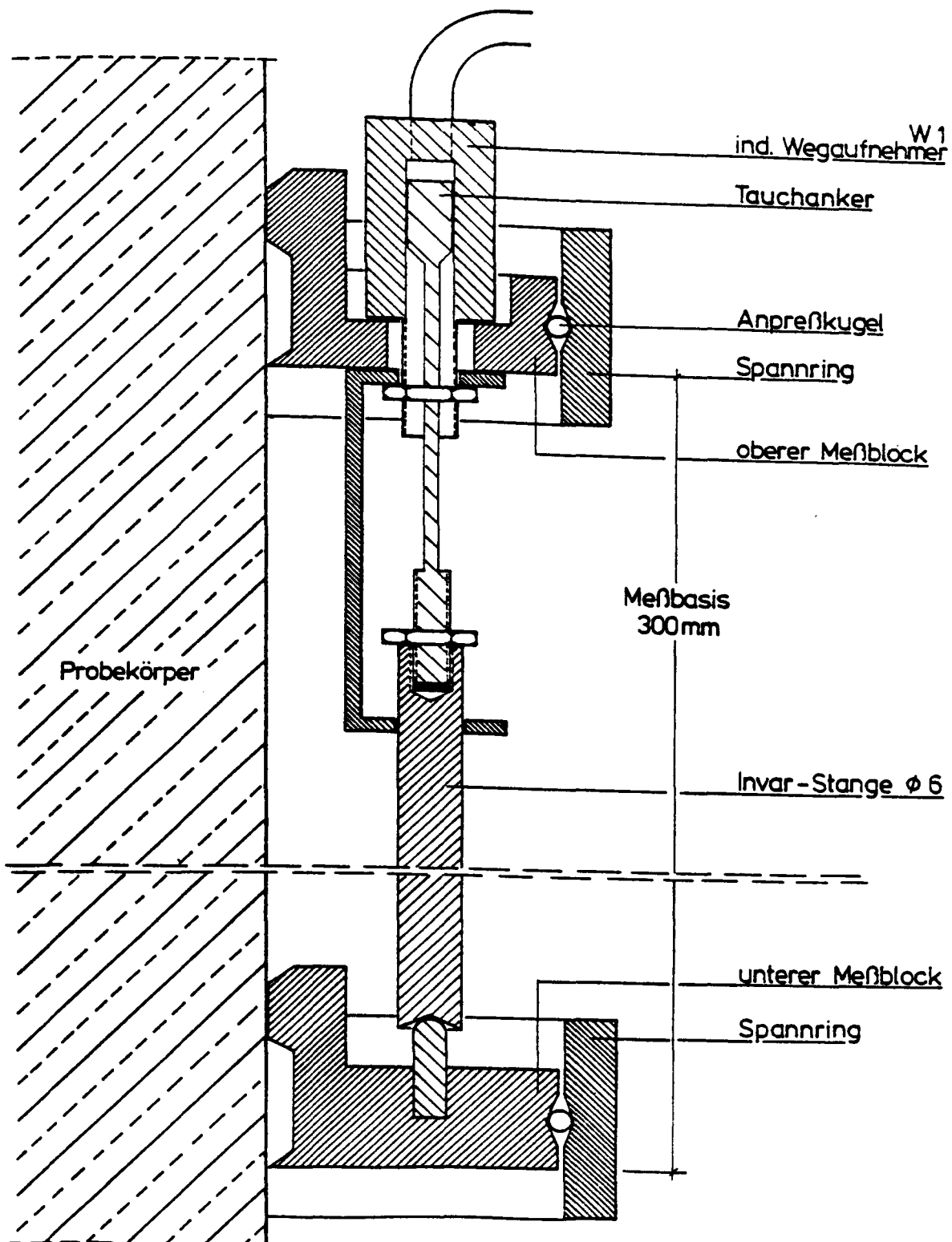


Abb. 12: Vertikalschnitt durch das Verformungsmeßsystem für Hohlzylinder

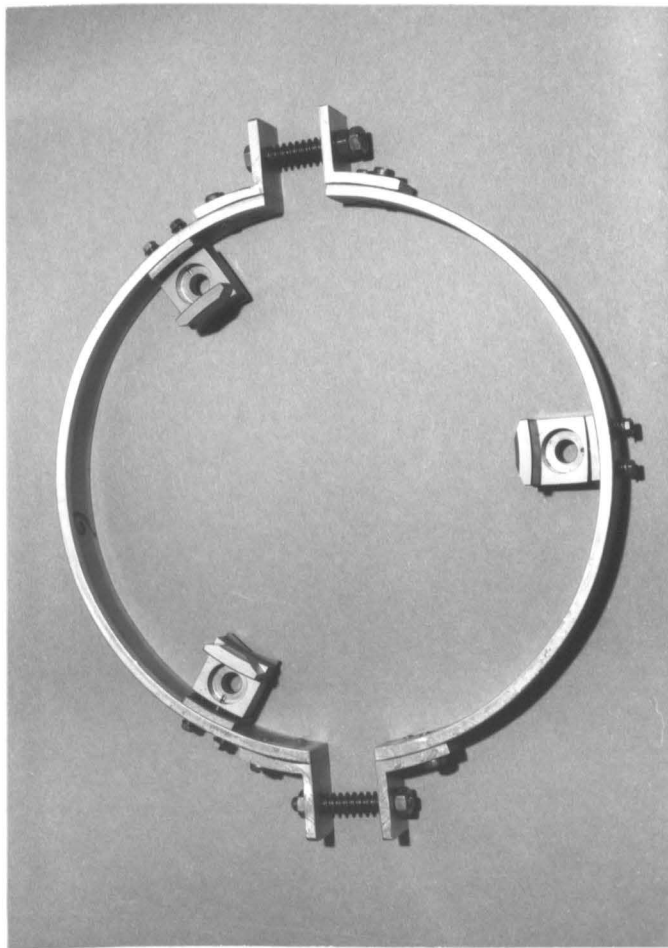


Abb. 13: Meßring für Verformungs-
messungen auf Hohlzylindern

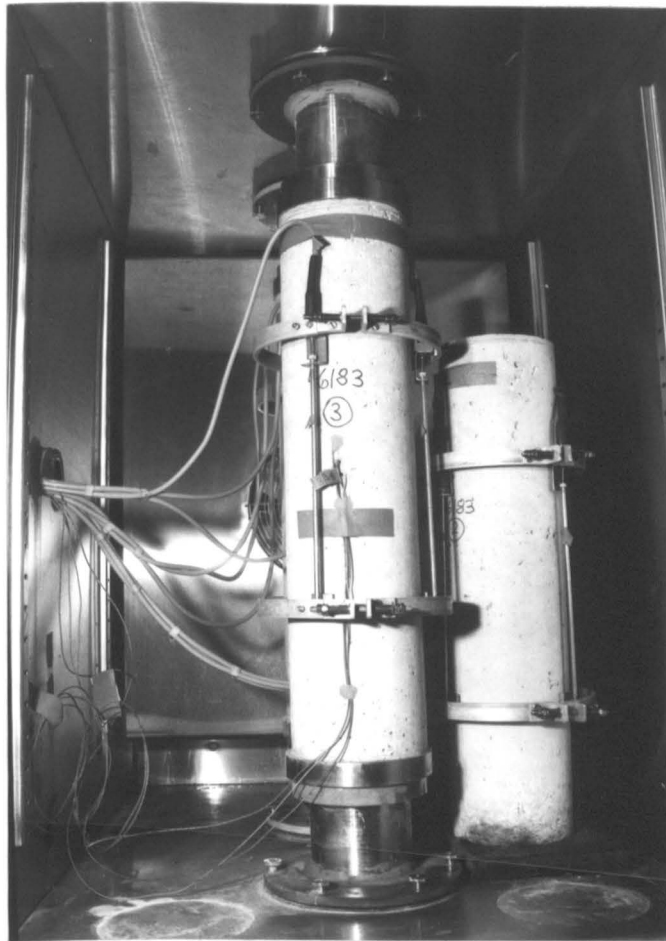


Abb. 14: Probekörper mit Meßsystem
in der Klimakammer



Abb. 15: Kriechversuchsstand mit
Salzlösungsbehälter für
hohe Luftfeuchtigkeit bei 20°C

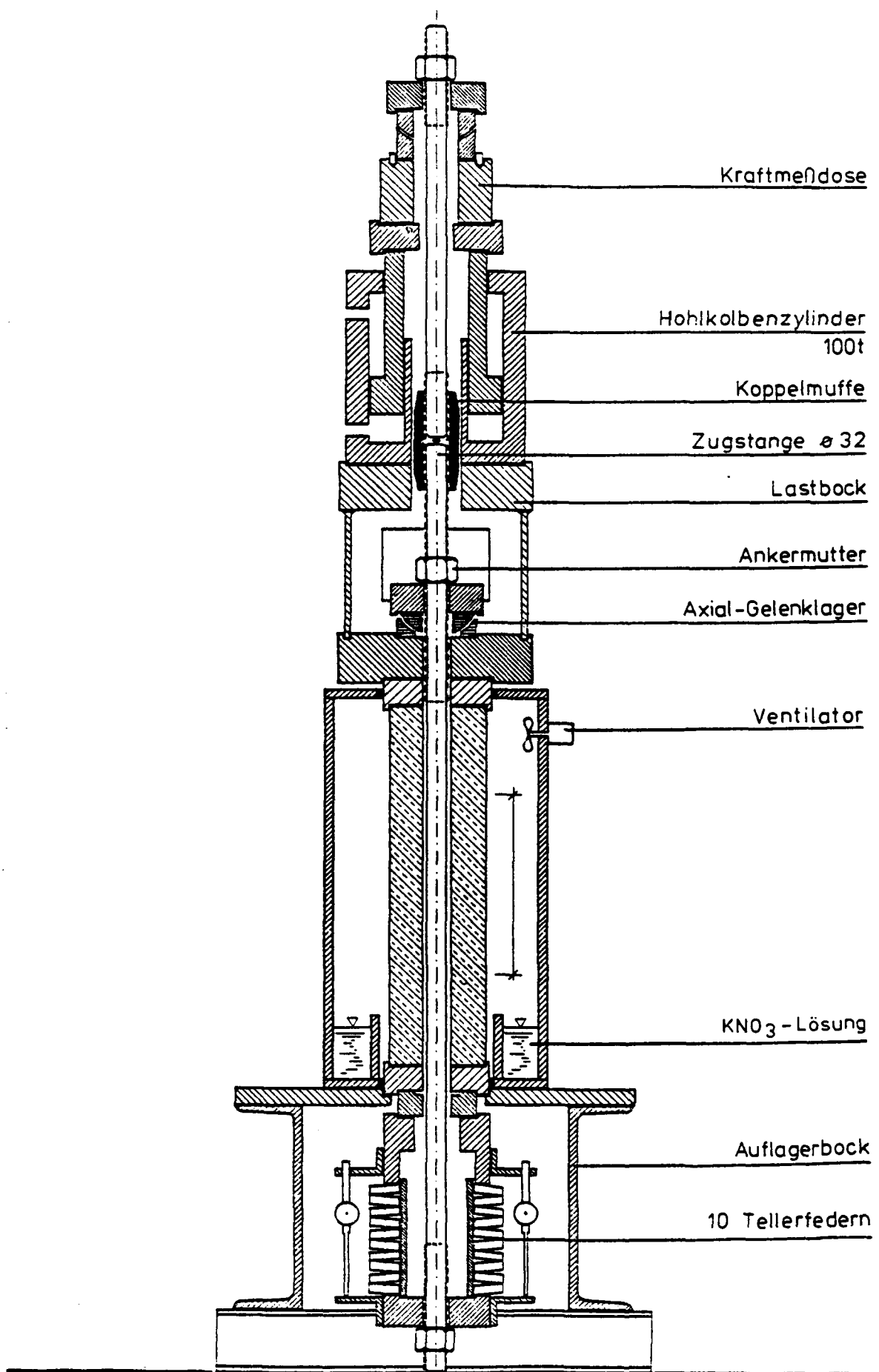


Abb. 16: Vertikalschnitt durch den Kriechversuchsstand mit Salzlösungsbehälter für hohe Luftfeuchtigkeit bei 20°C

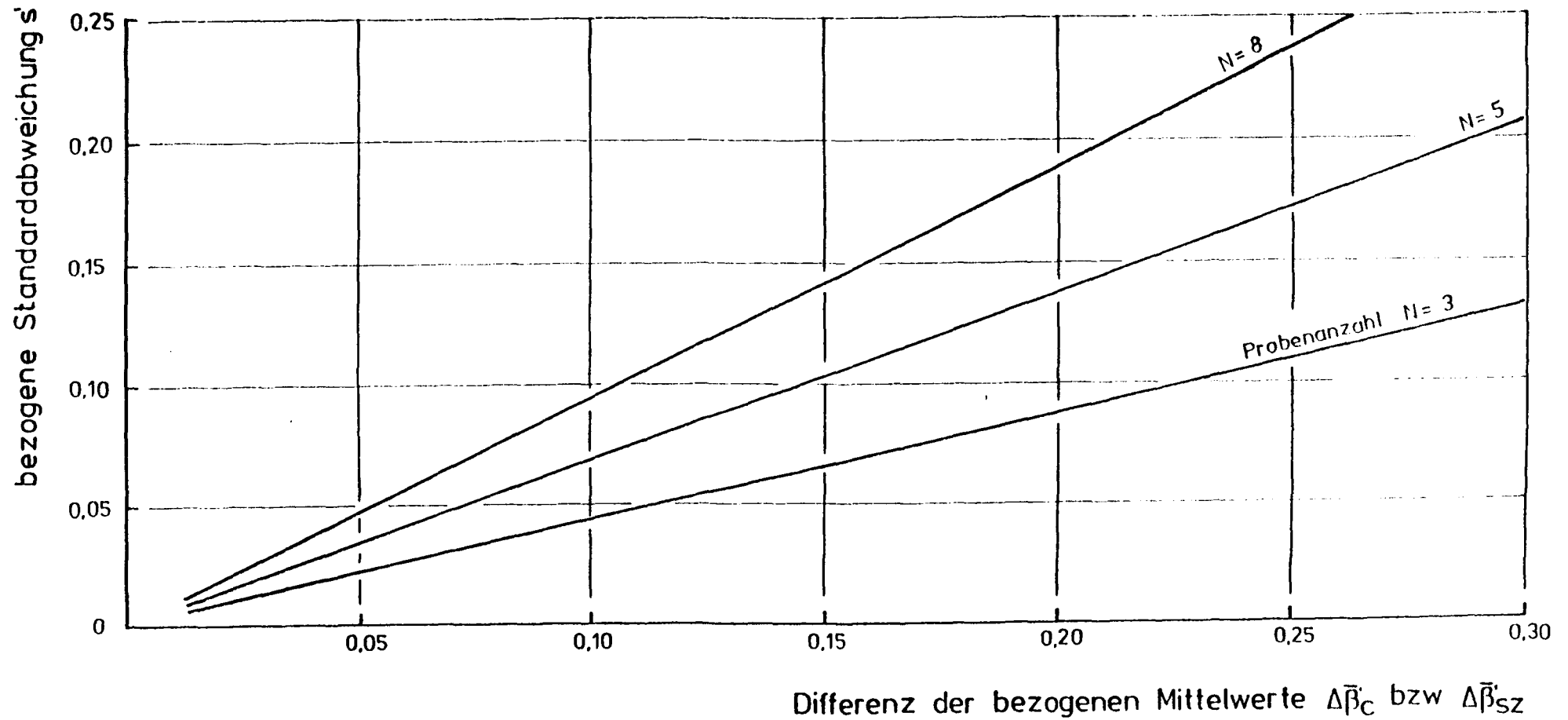


Abb. 17: Signifikanzgrenzen beim t- Test in Funktion der Probenanzahl für die Wahrscheinlichkeit $1-\alpha=0,95$

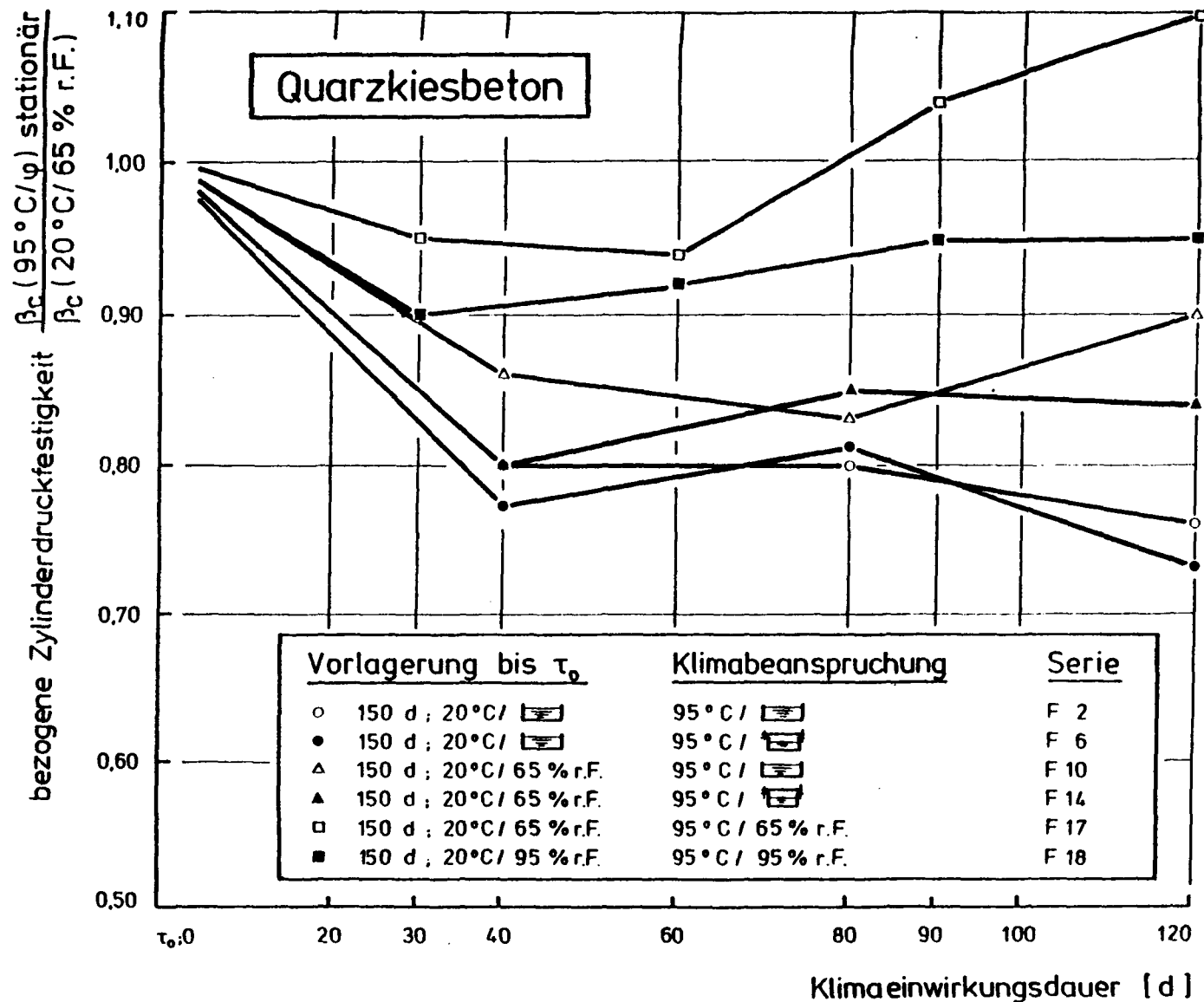


Abb. 18: Zylinderdruckfestigkeit von Quarzkiesbeton nach stationärer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer

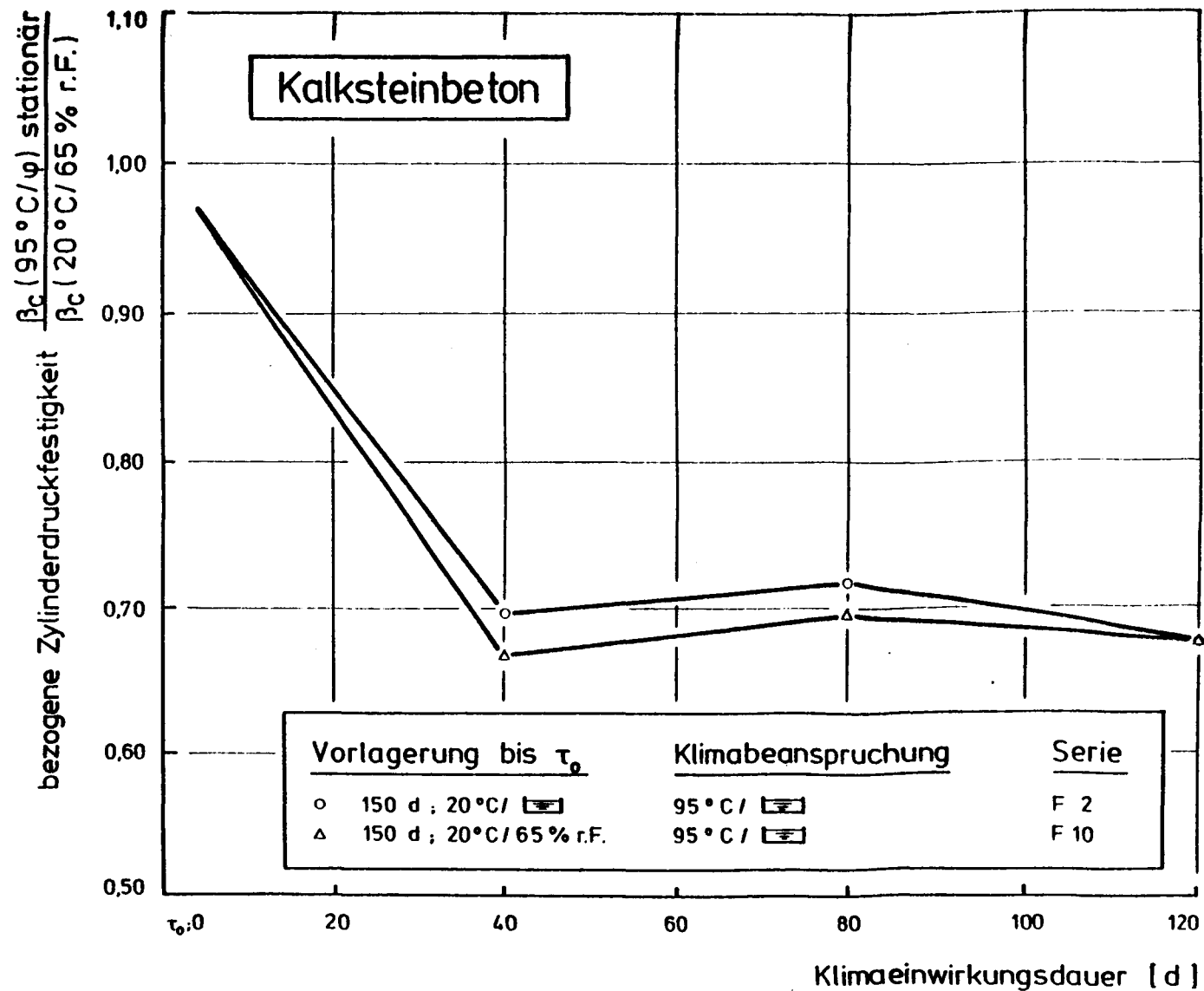


Abb. 19: Zylinderdruckfestigkeit von Kalksteinbeton nach stationärer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer

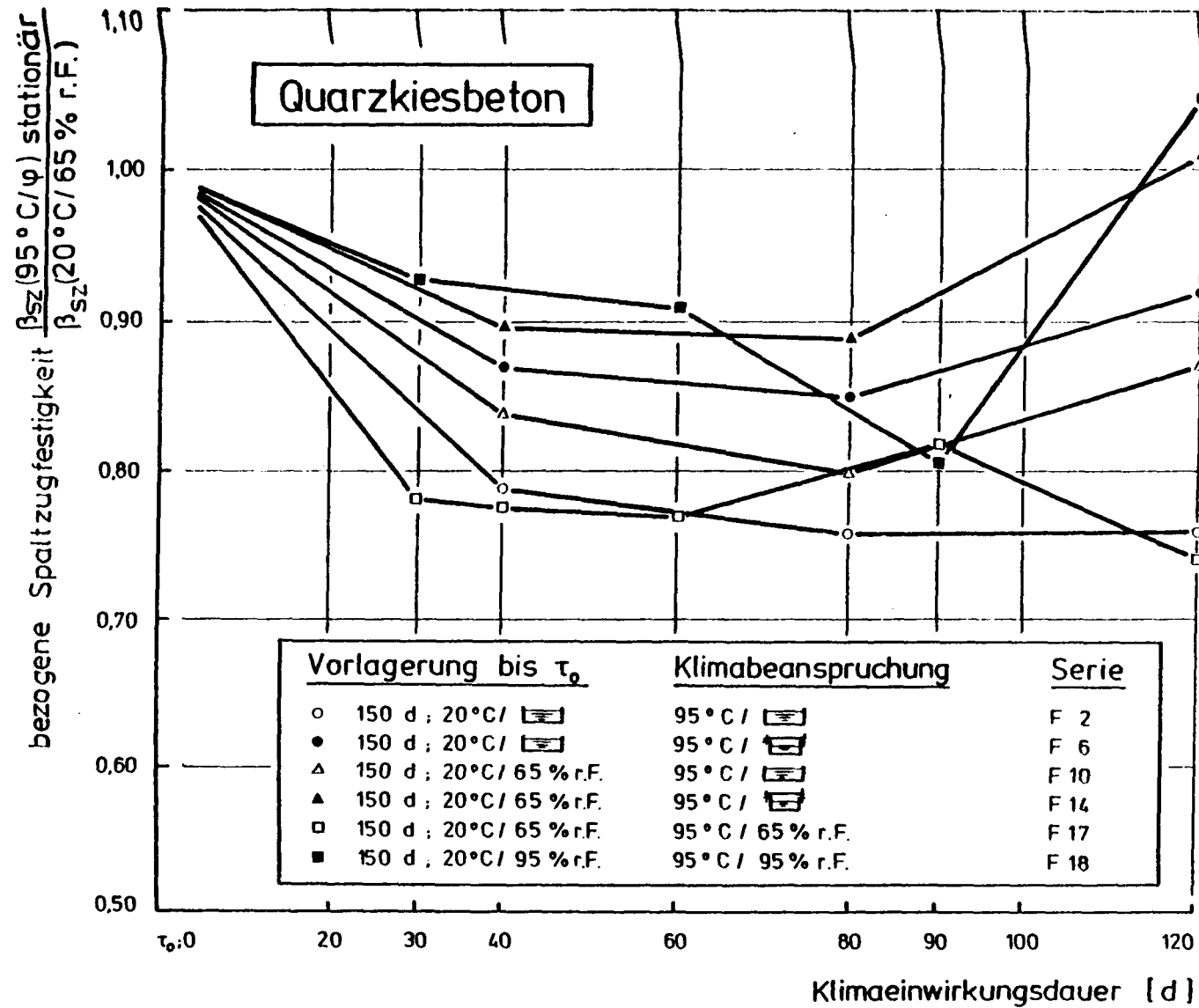


Abb. 20: Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton nach stationärer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer

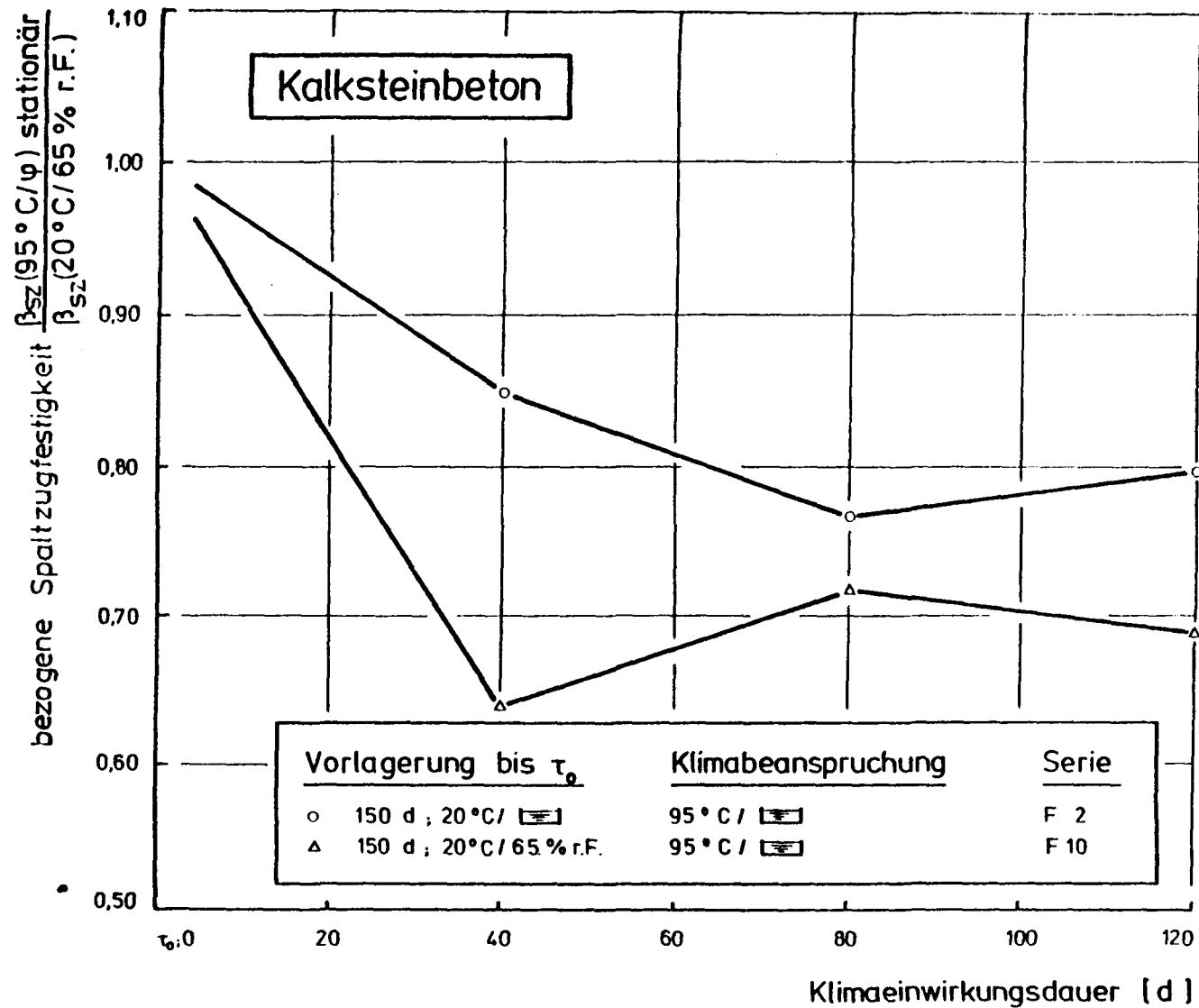


Abb. 21: Spaltzugfestigkeit von Kalksteinbeton nach stationärer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer

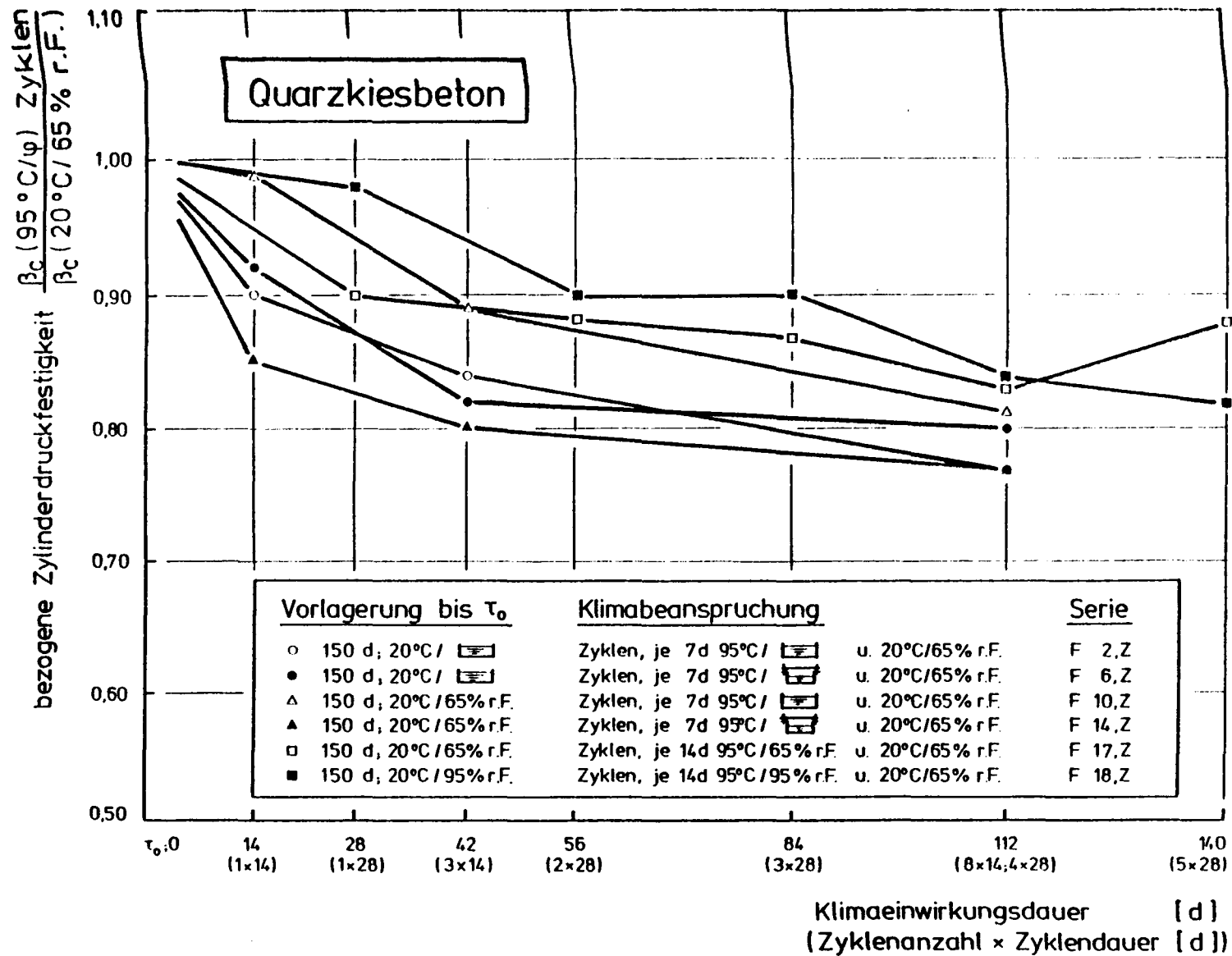


Abb. 22: Zylinderdruckfestigkeit von Quarzkiesbeton nach zyklischer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Zyklenzahl

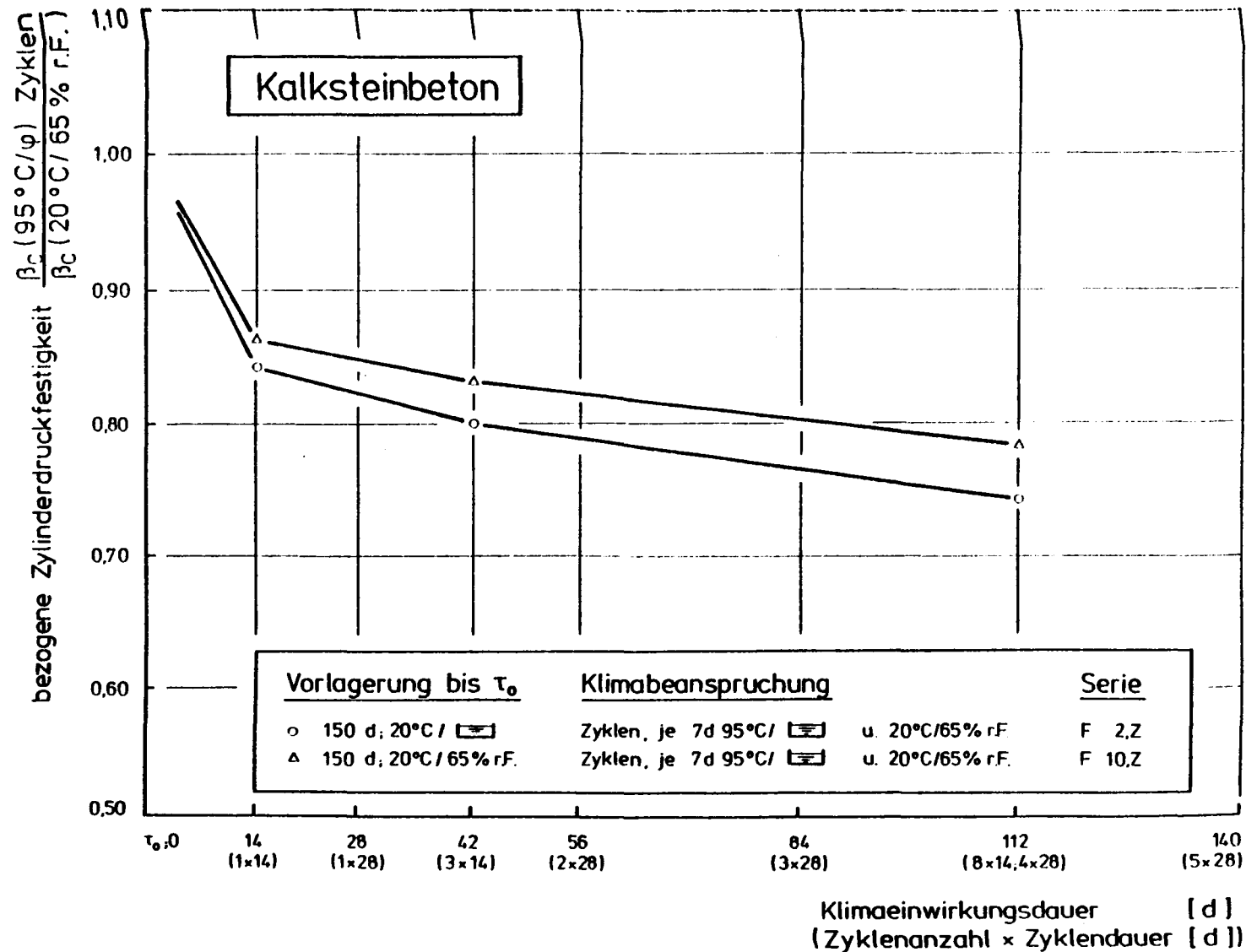


Abb. 23: Zylinderdruckfestigkeit von Kalksteinbeton nach zyklischer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Zykluszahl

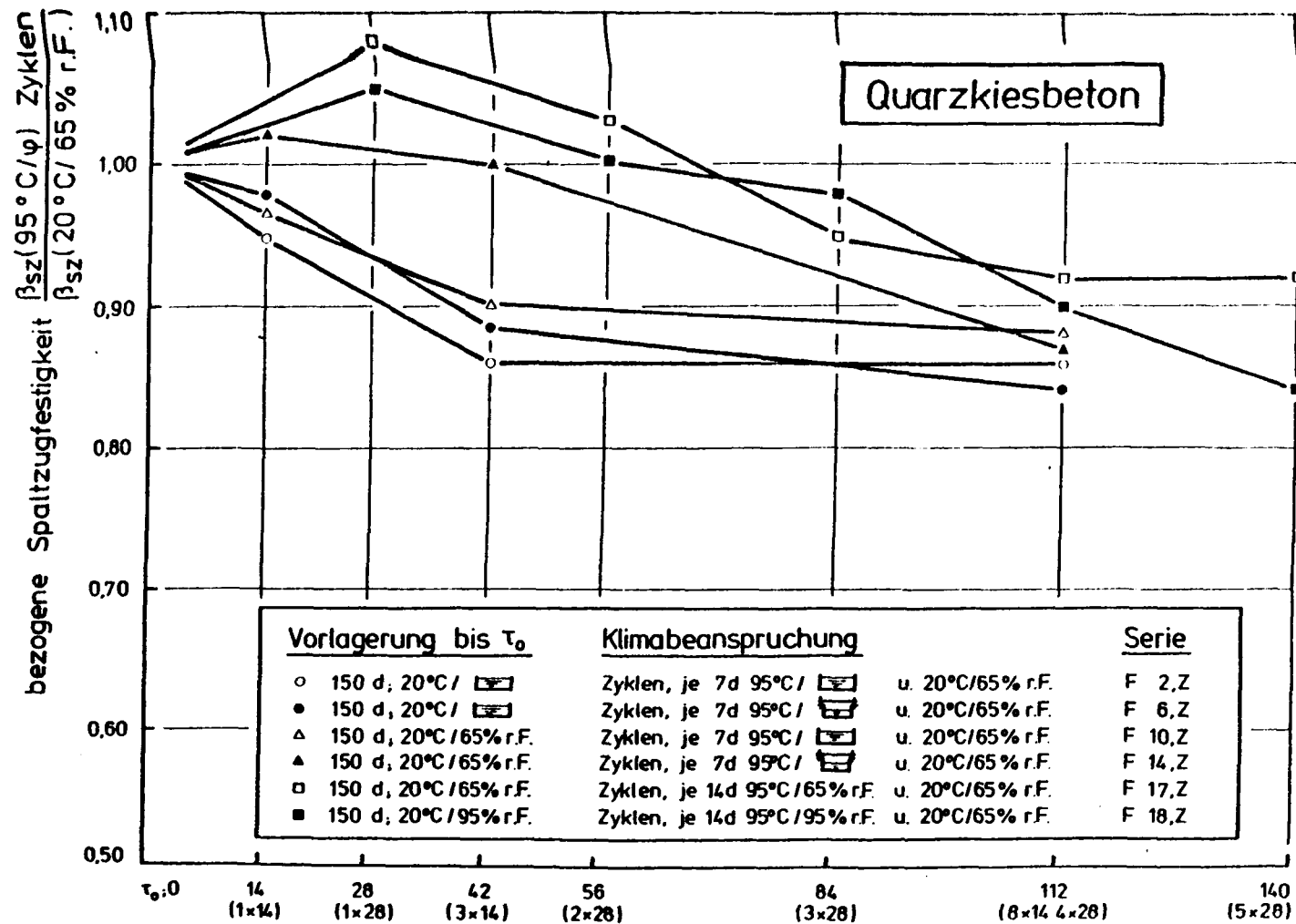


Abb. 24: Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton nach zyklischer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Zyklenzahl

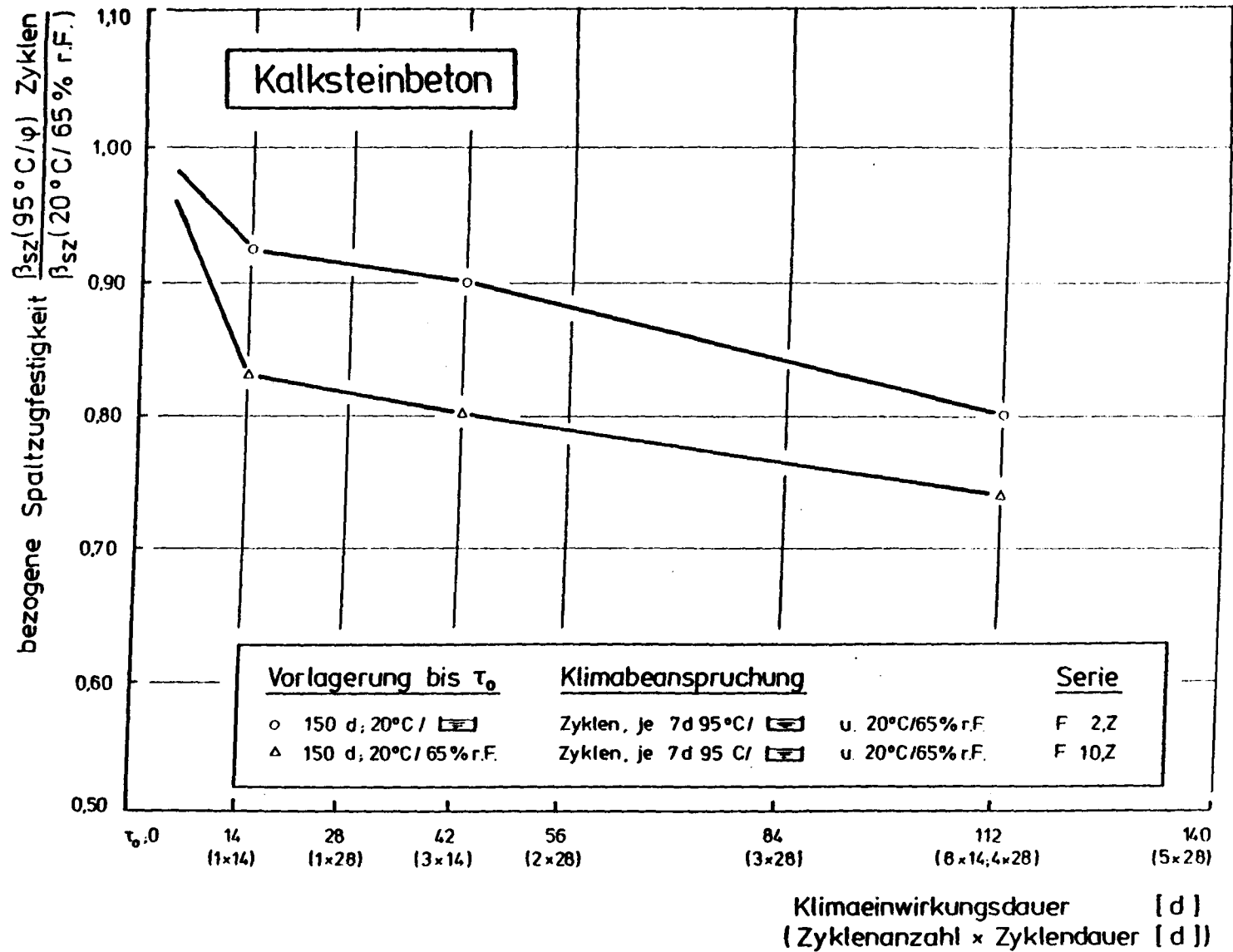


Abb. 25: Spaltzugfestigkeit von Kalksteinbeton nach zyklischer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Zykluszahl

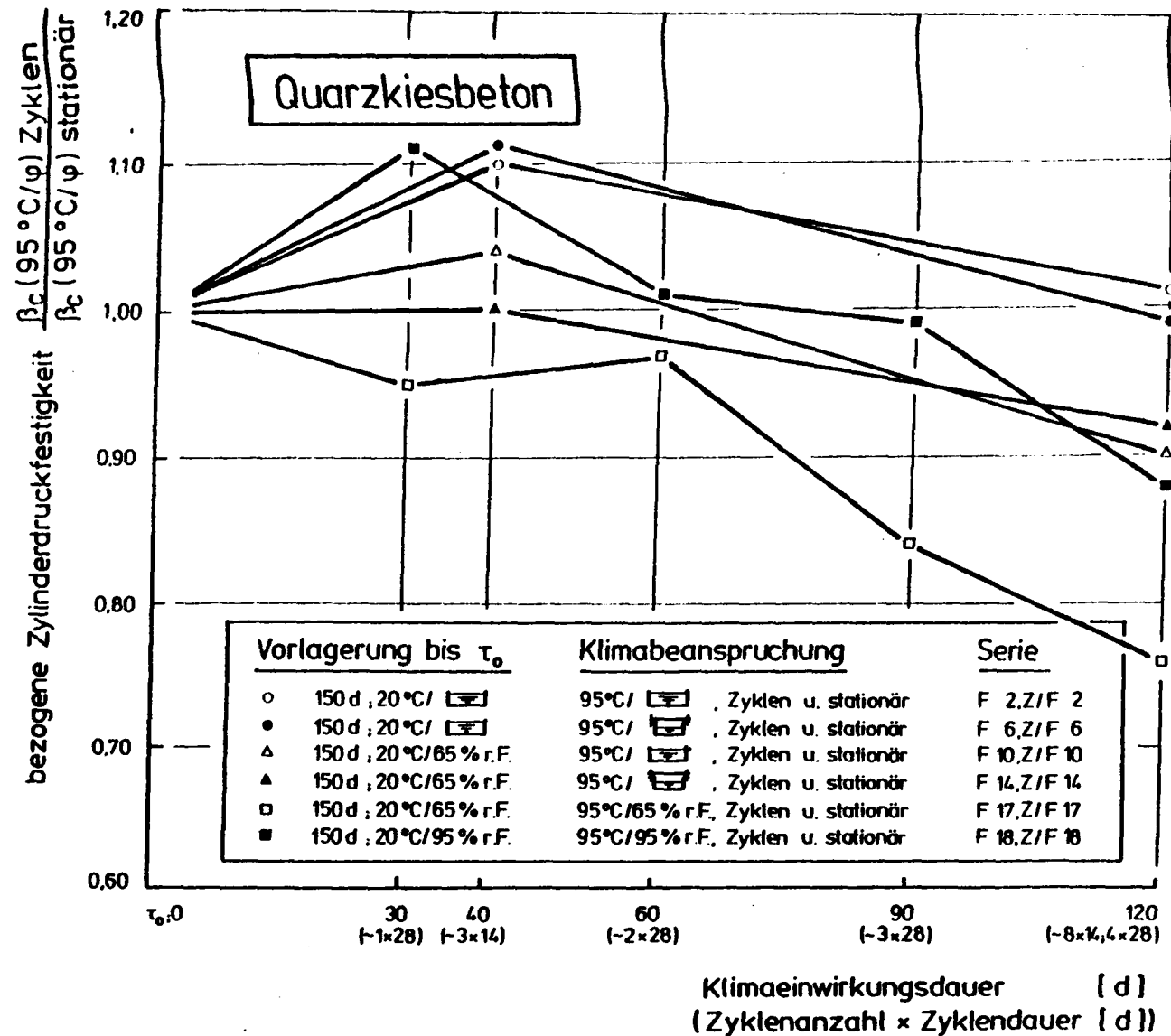


Abb. 26: Einfluß zyklischer Klimaeinwirkung auf die Zylinderdruckfestigkeit von Quarzkiesbeton gegenüber stationärer

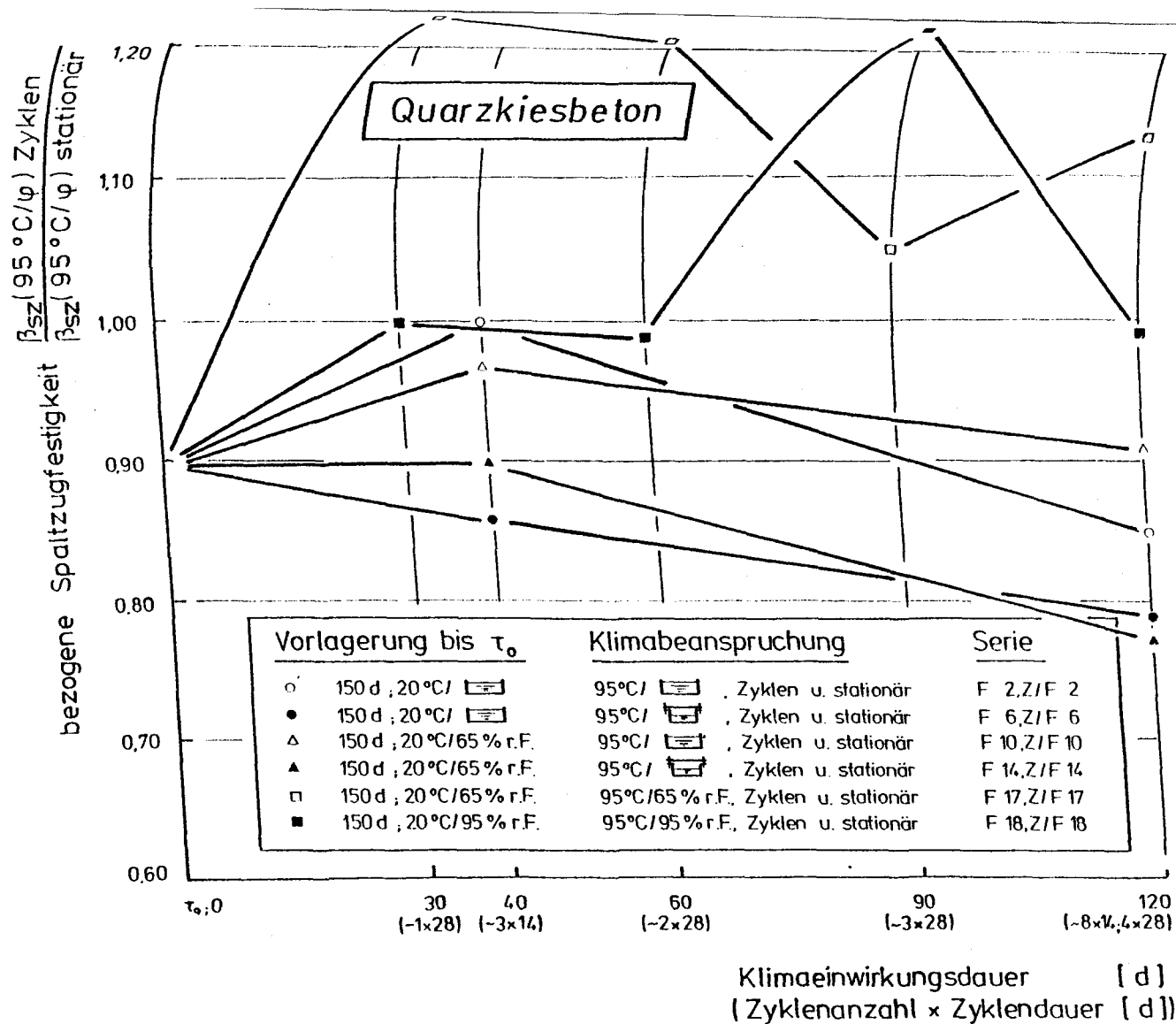


Abb. 27: Einfluß zyklischer Klimaeinwirkung auf die Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton gegenüber stationärer Einwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer

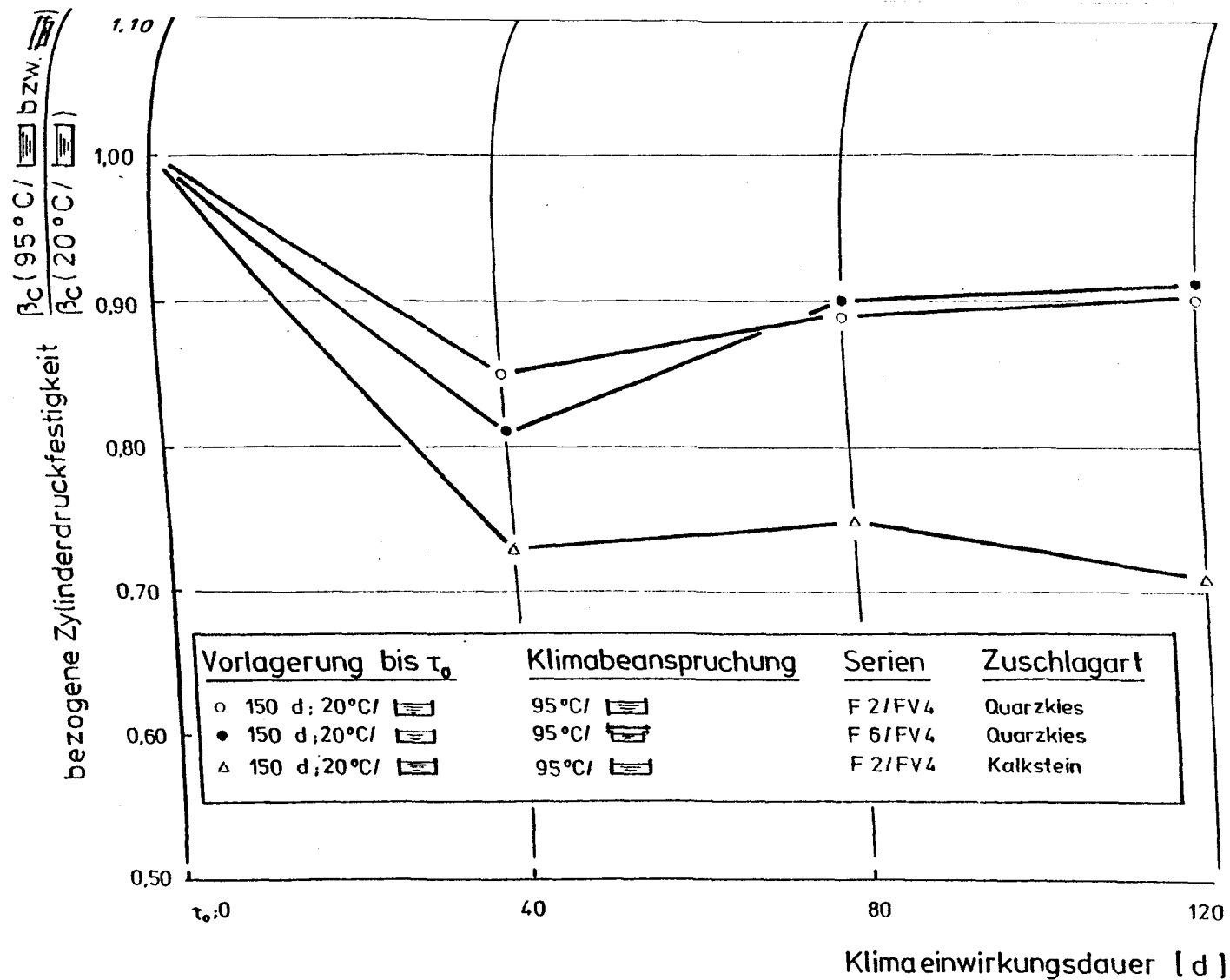


Abb. 28: Einfluß erhöhter Temperatur $T=95^\circ\text{C}$ auf die Zylinderdruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer bei Verhinderung von Trocknung

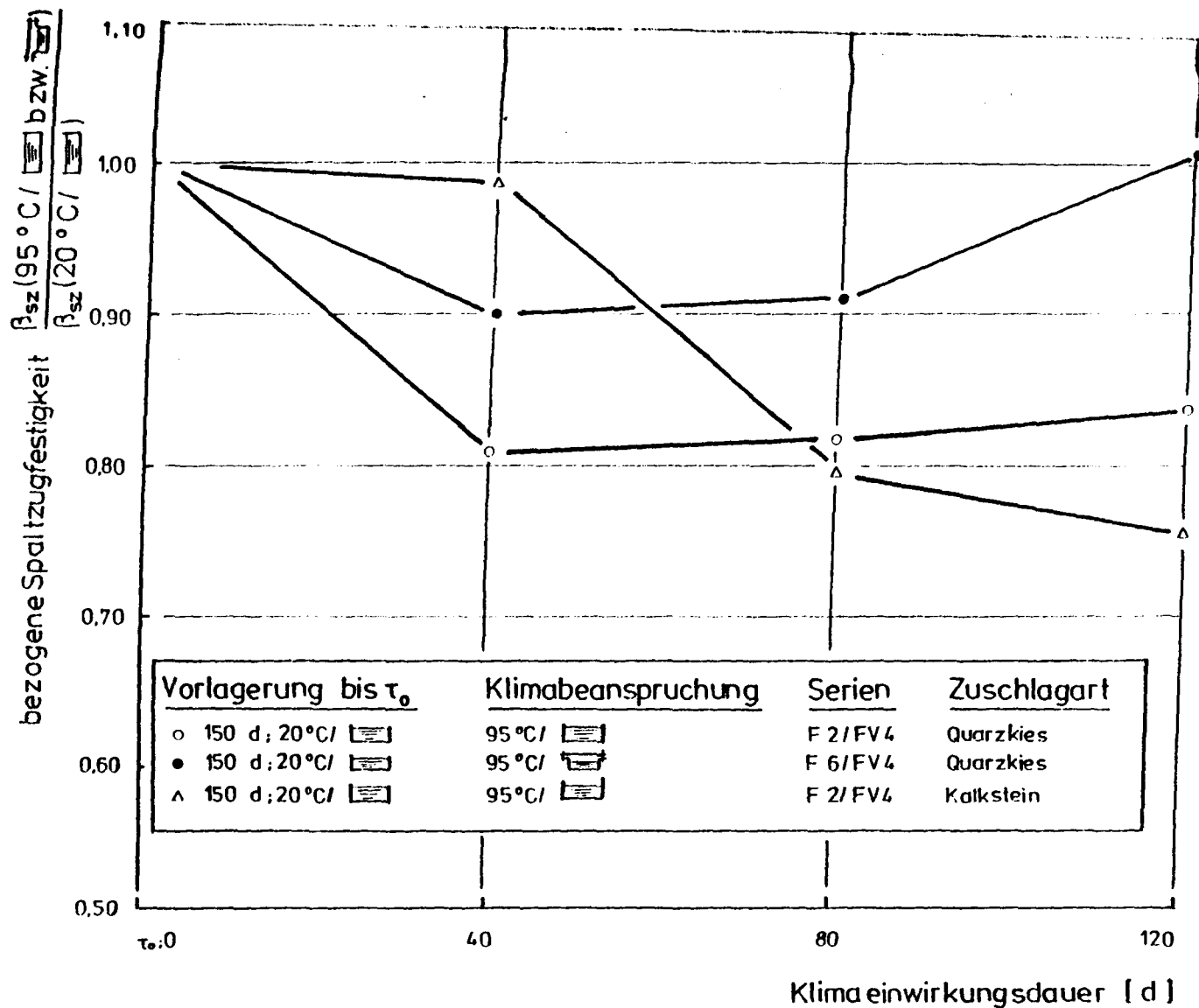


Abb. 29: Einfluß erhöhter Temperatur $T=95^\circ\text{C}$ auf die Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von der Einwirkungs-dauer bei Verhinderung von Trocknung

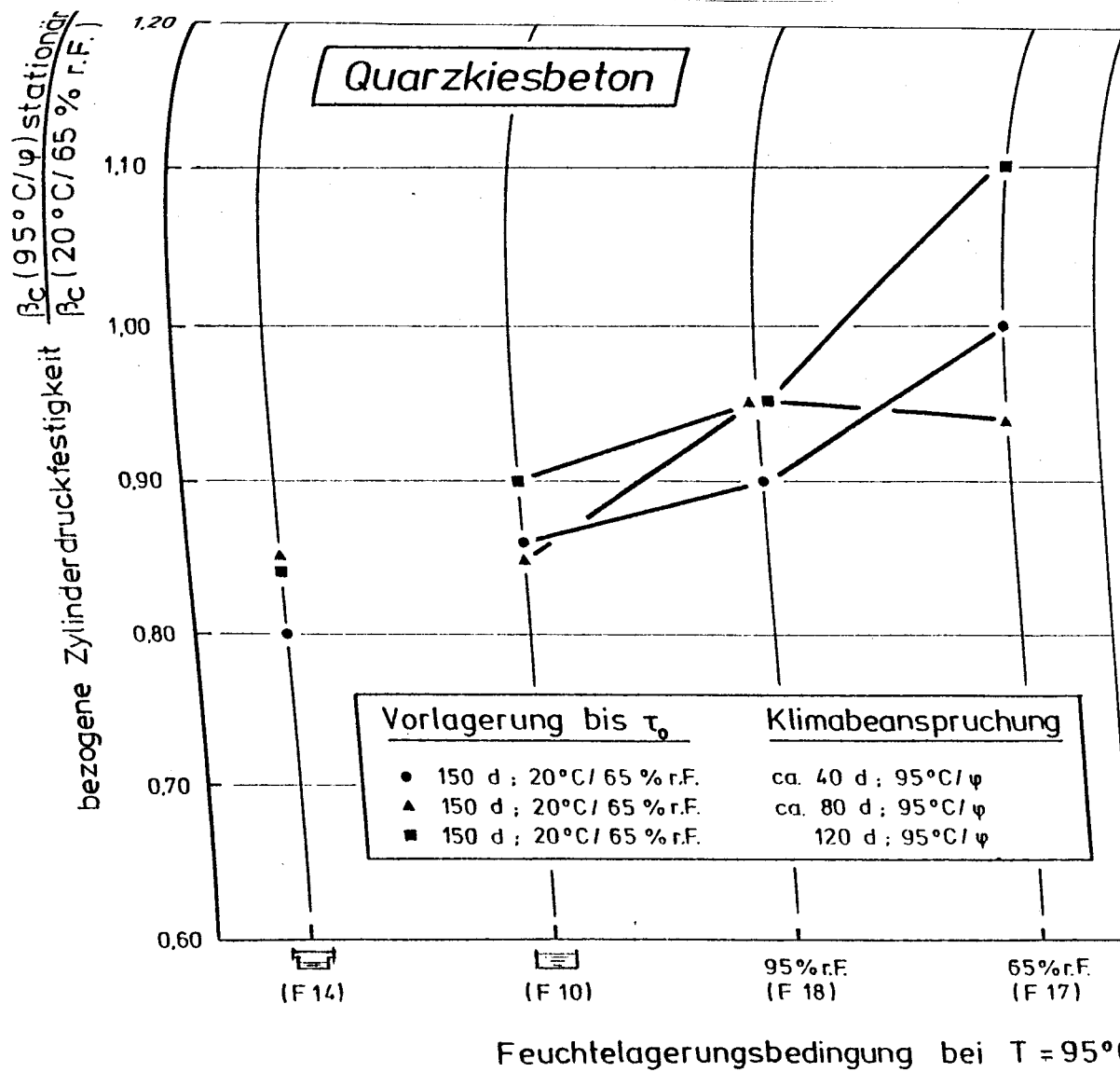


Abb. 30: Einfluß der Feuchtebedingung während Temperatureinwirkung auf die Zylinderdruckfestigkeit von Quarzkiesbeton

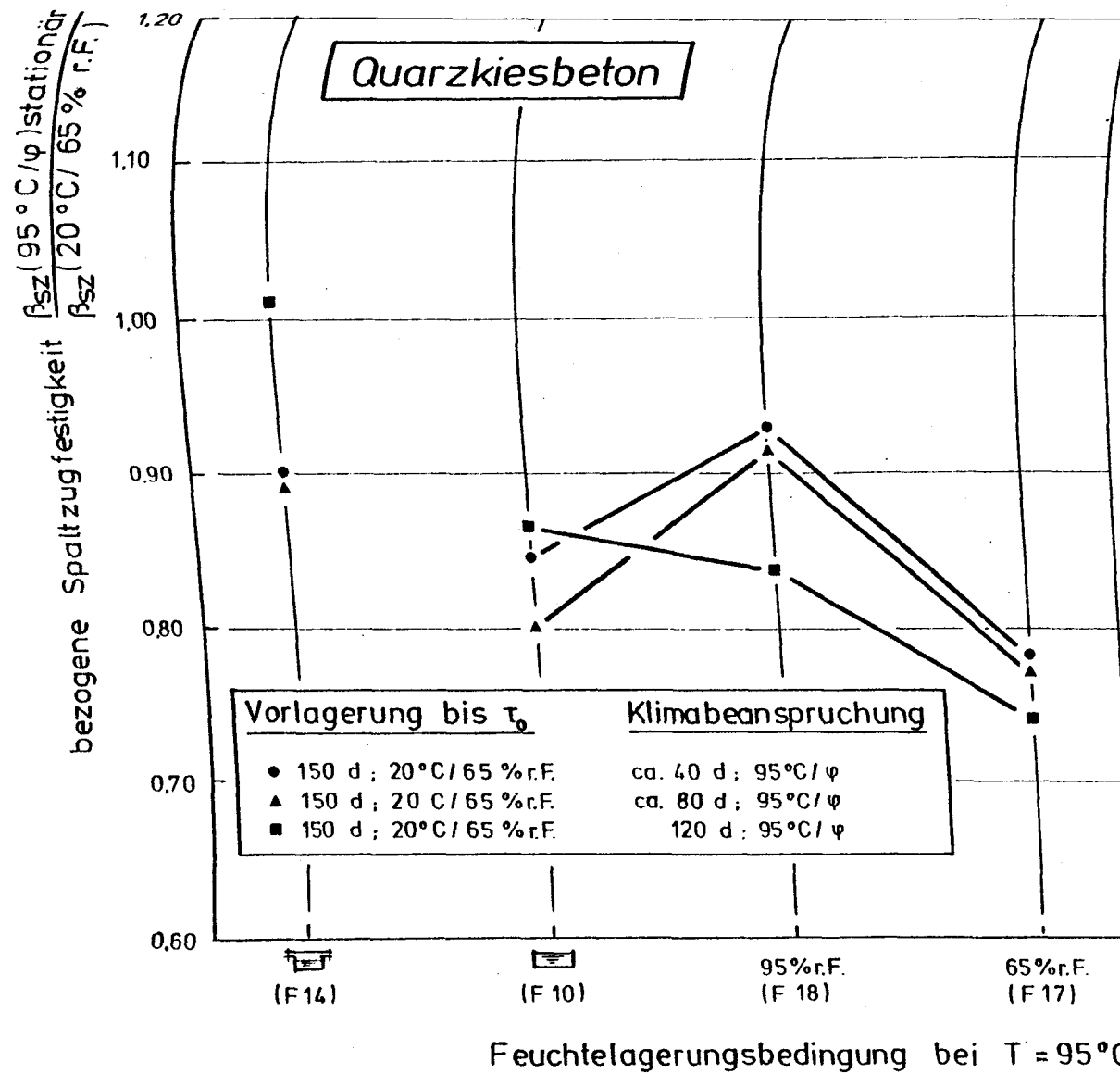


Abb. 31: Einfluß der Feuchtebedingung während Temperatureinwirkung auf die Spaltzugfestigkeit von Quarzkiesbeton

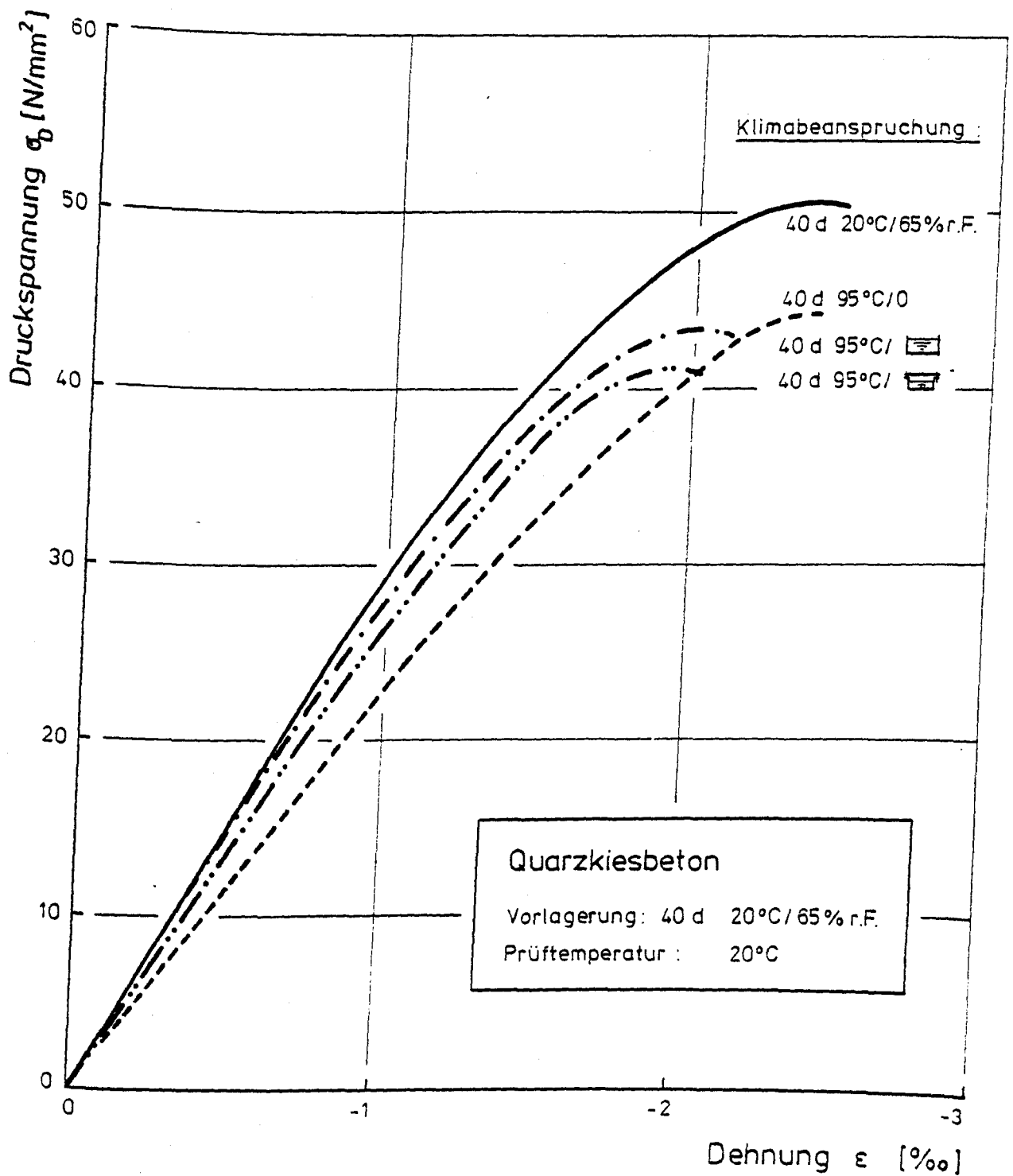


Abb. 32: σ/ϵ - Linien von Quarzkiesbeton nach stationärer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 40d 20°C/65%r.F.)

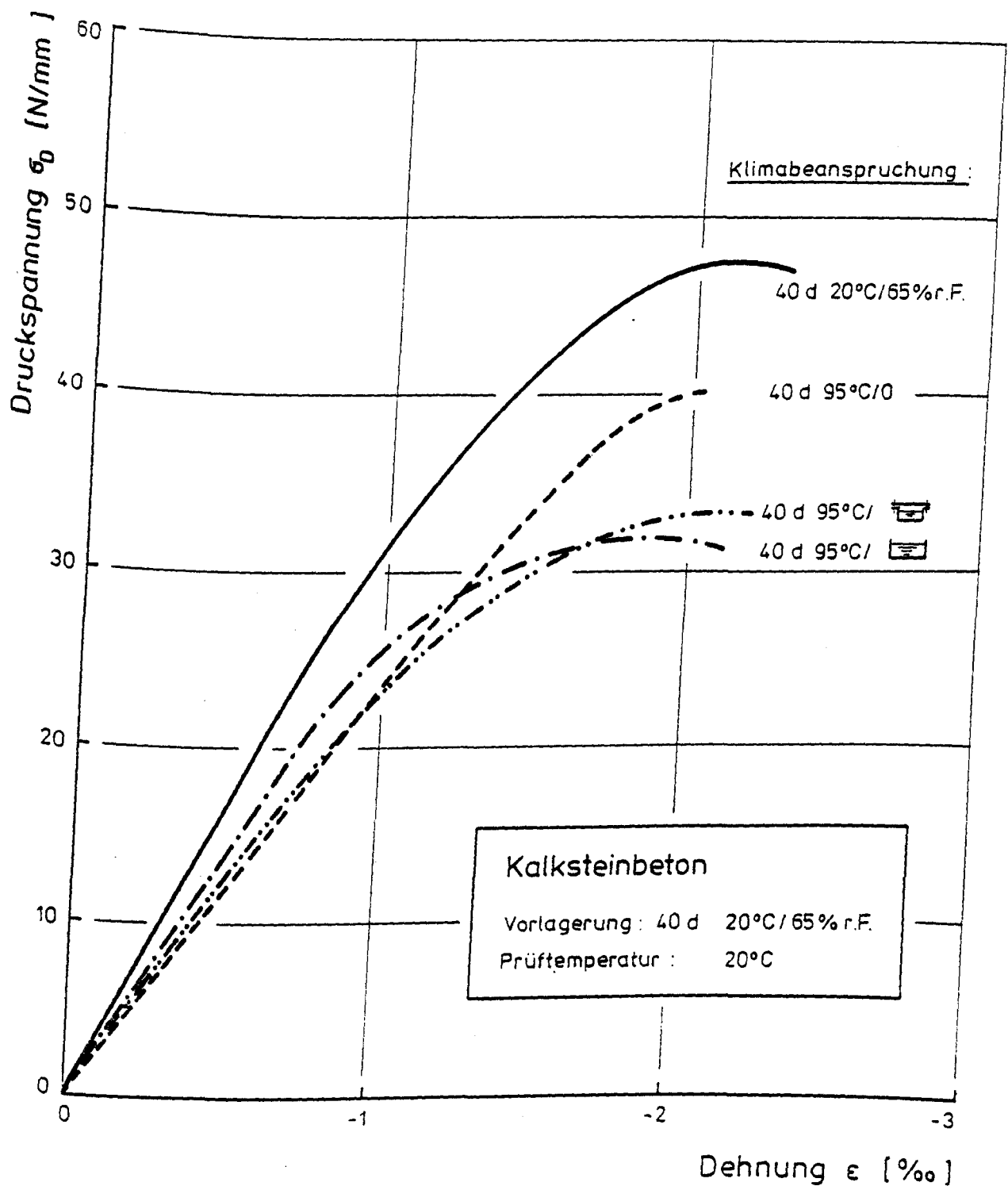


Abb. 33: σ/ϵ - Linien von Kalksteinbeton nach stationärer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 40d 20°C/65%r.F.)

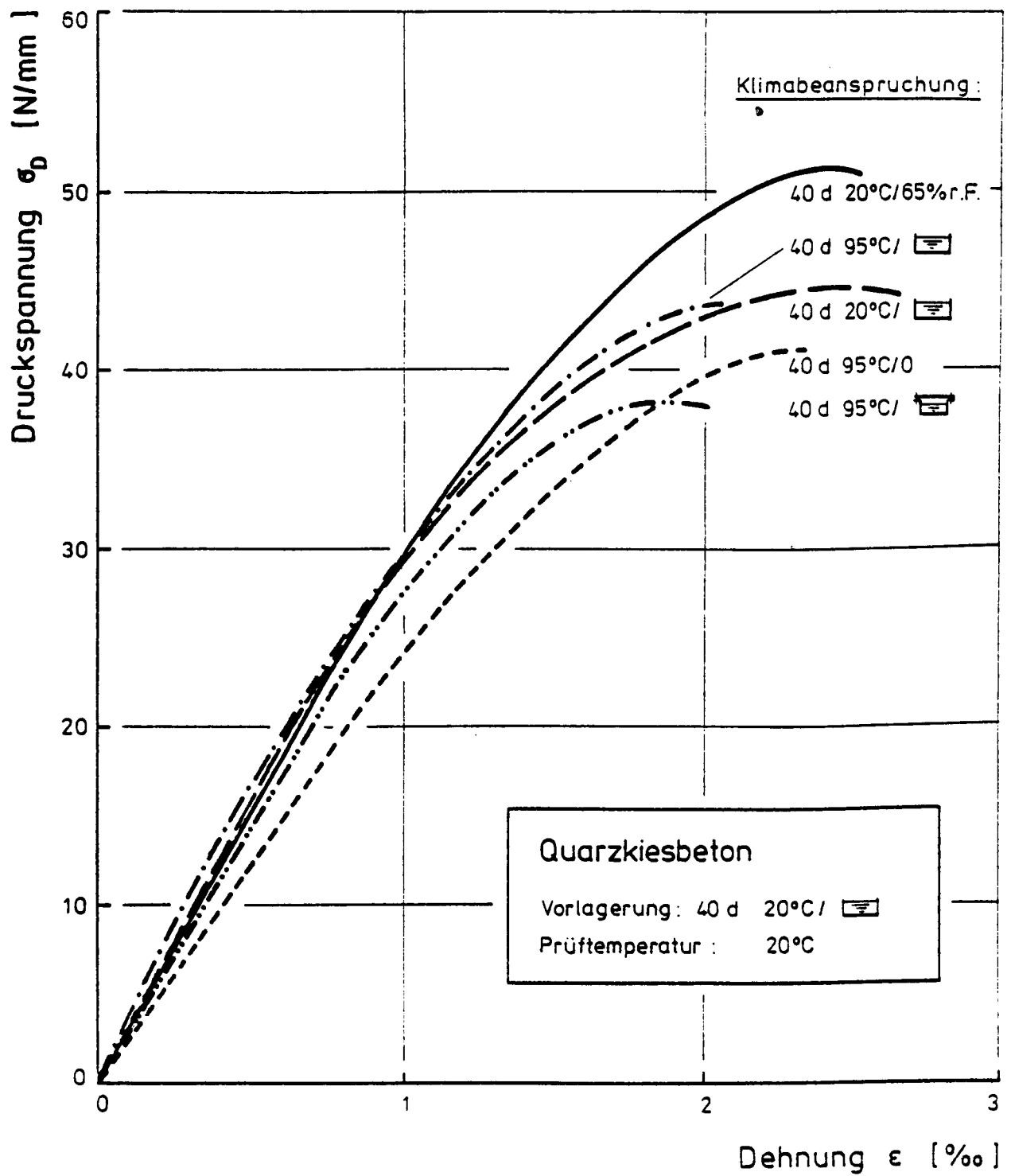


Abb. 34: σ/ϵ - Linien von Quarzkiesbeton nach stationärer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 40d 20°C/III)

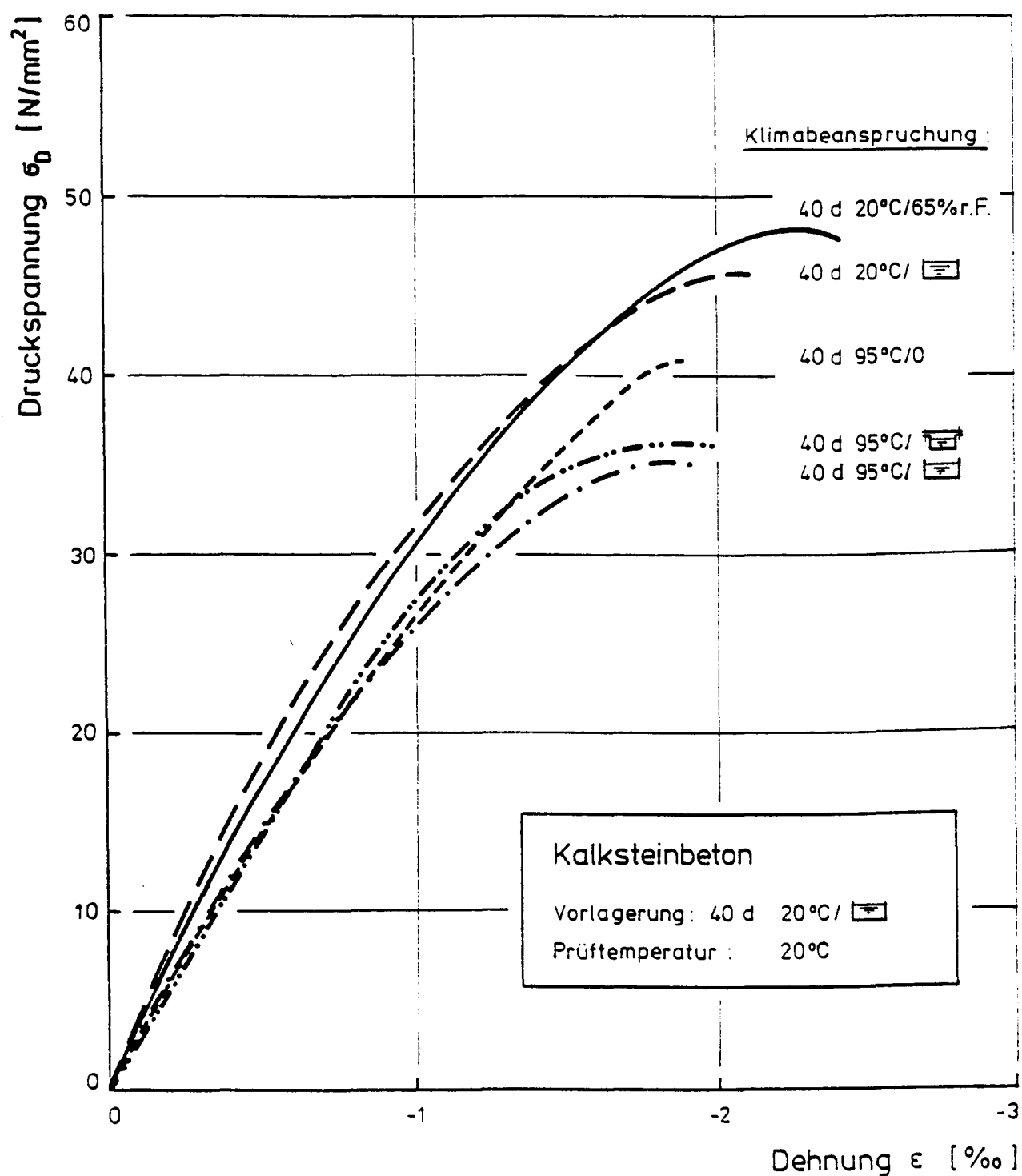


Abb. 35: σ/ϵ - Linien von Kalksteinbeton nach stationärer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 40d 20°C/☐)

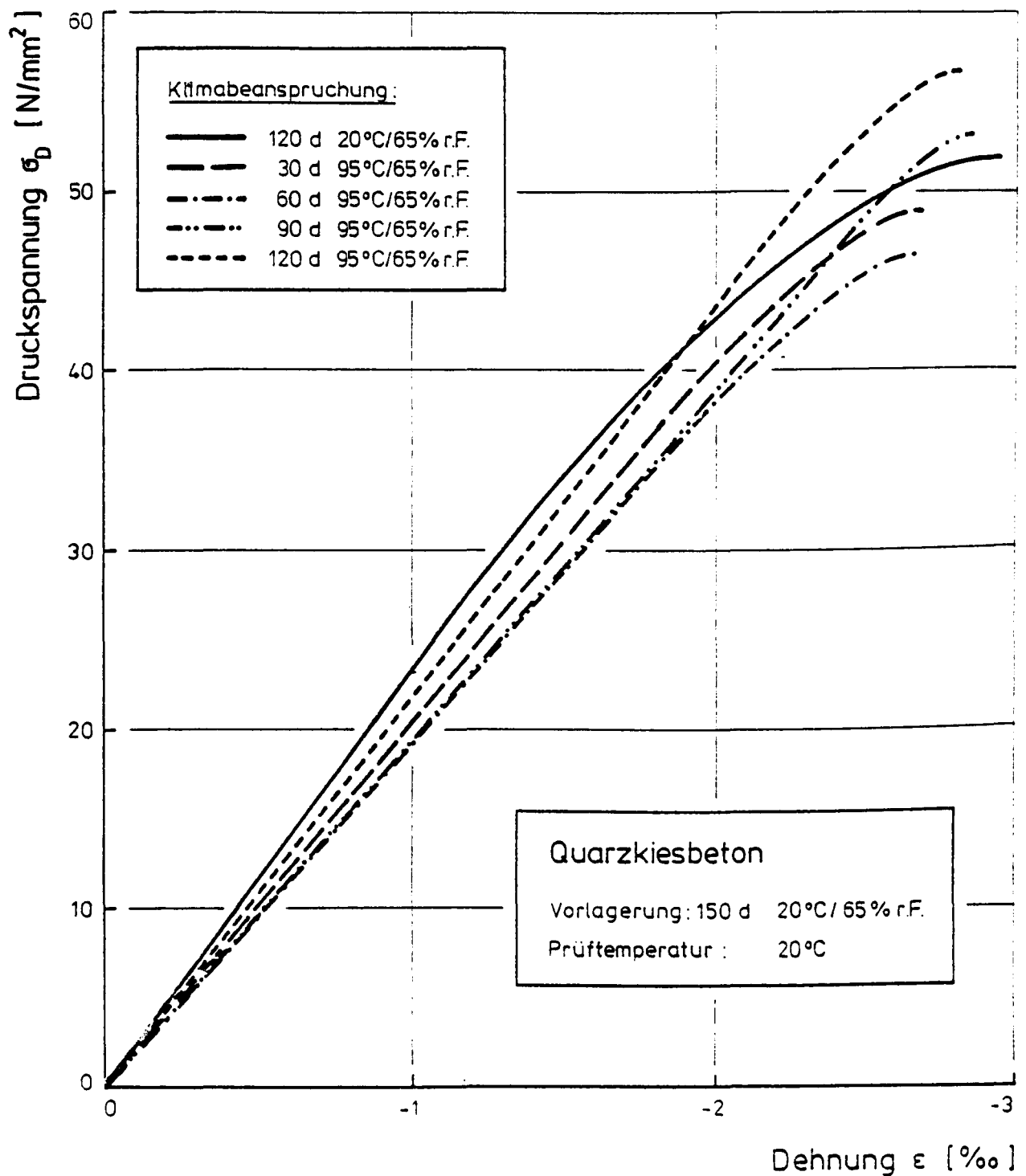


Abb. 36: σ/ϵ - Linien von Quarzkiesbeton nach stationärer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer (Vorlagerung: 150d 20°C/65% r.F.)

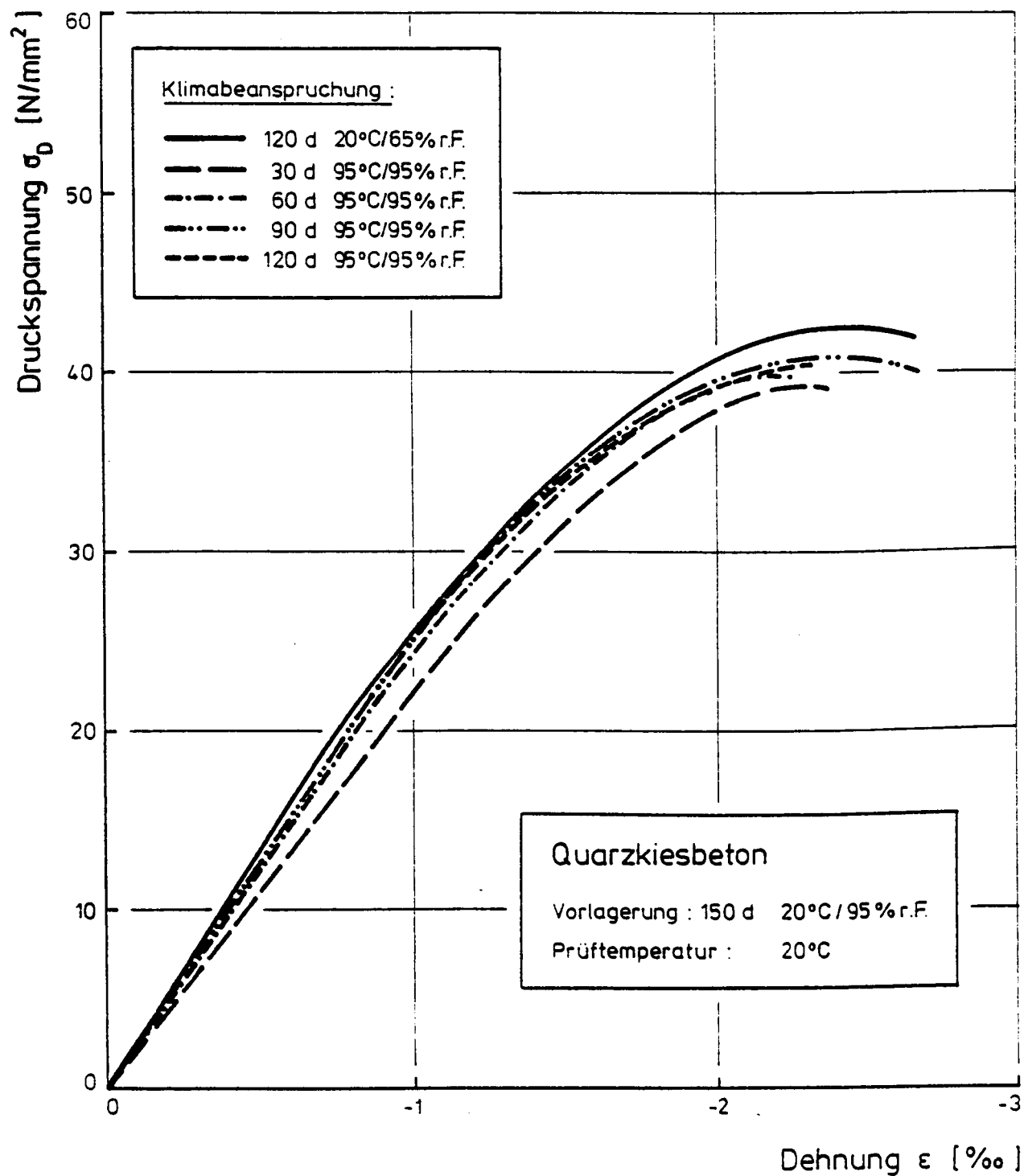


Abb. 37: σ/ϵ - Linien von Quarkiesbeton nach stationärer Klimaeinwirkung in Abhängigkeit von der Einwirkungsdauer (Vorlagerung: 150d 20°C/95% r.F.)

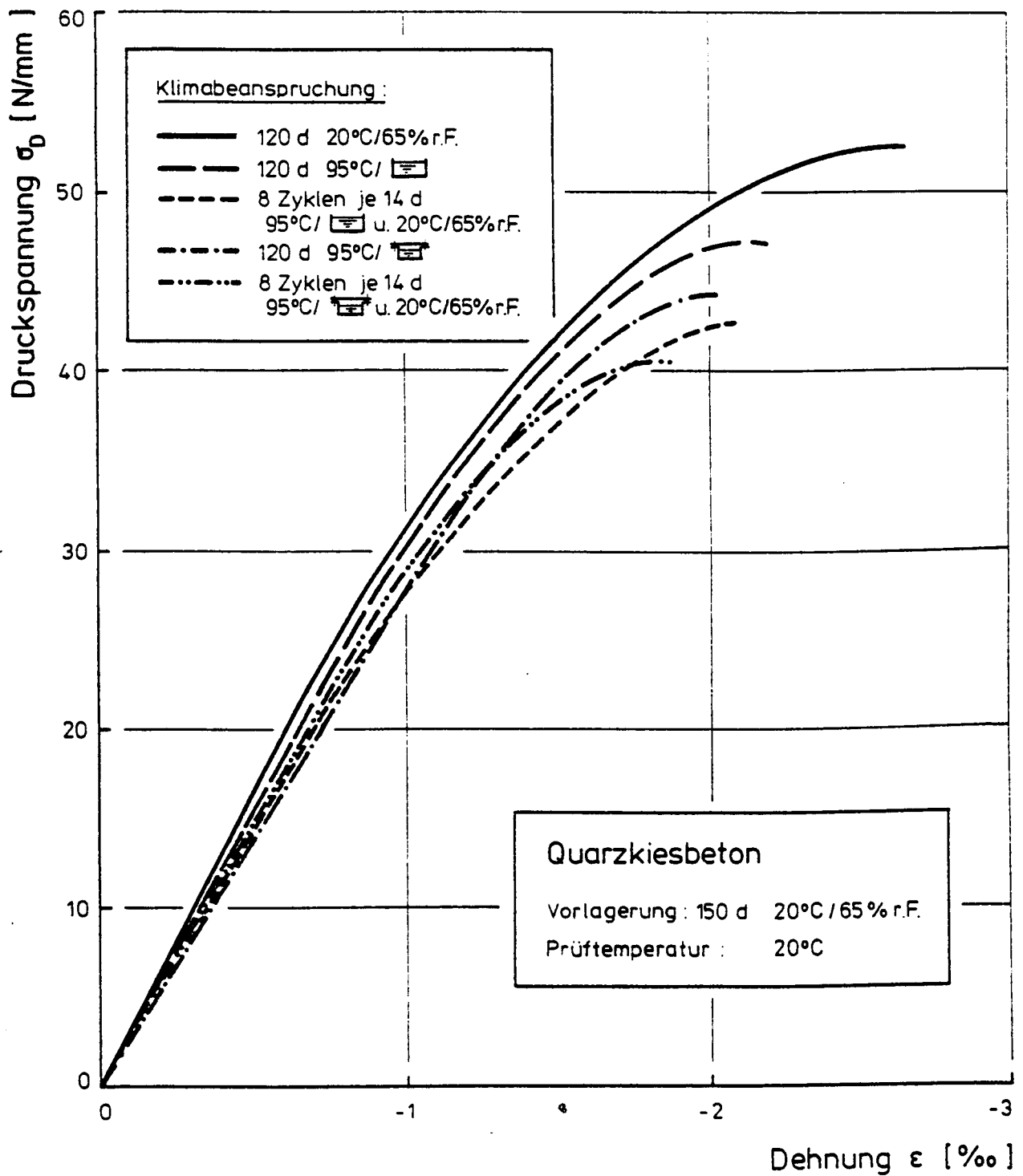


Abb. 38: Gegenüberstellung der σ/ϵ - Linien von Quarzkiesbeton nach stationärer und zyklischer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 150d 20°C/65%r.F.)

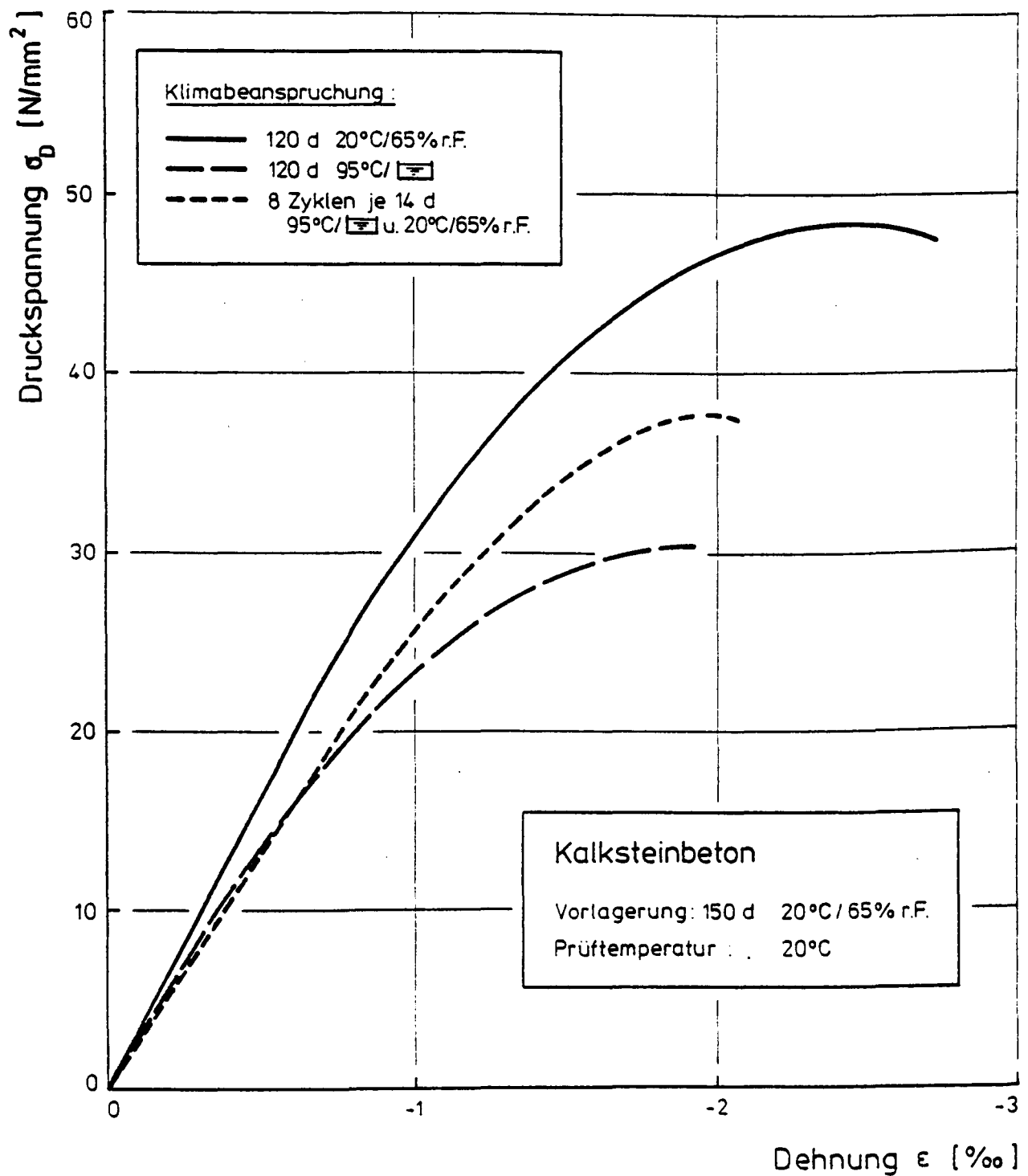


Abb. 39: Gegenüberstellung der σ/ϵ - Linien von Kalksteinbeton nach stationärer und zyklischer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 150d 20°C/65% r.F.)

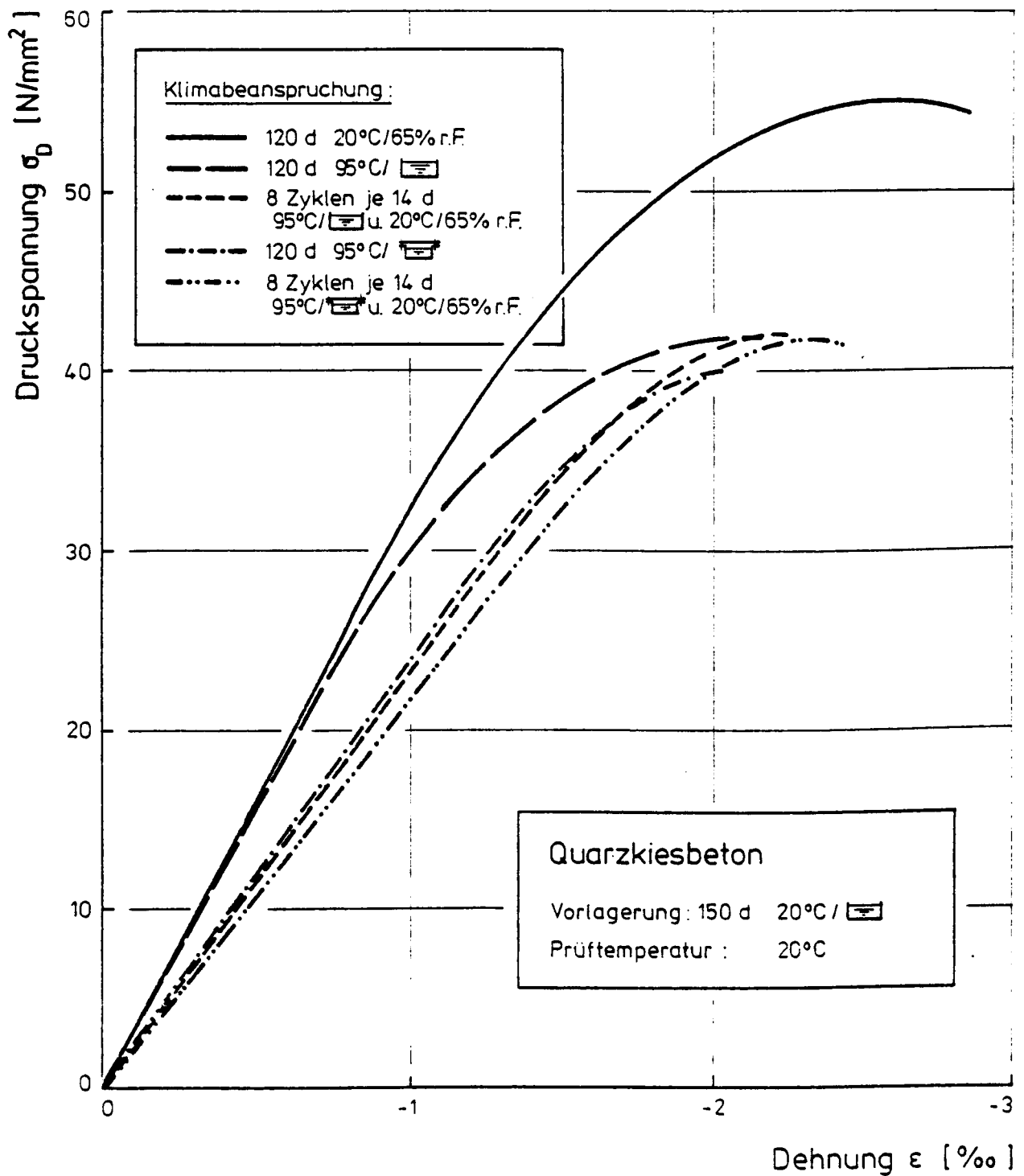


Abb. 40: Gegenüberstellung der σ/ϵ - Linien von Quarkiesbeton nach stationärer und zyklischer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 150d 20°C/)

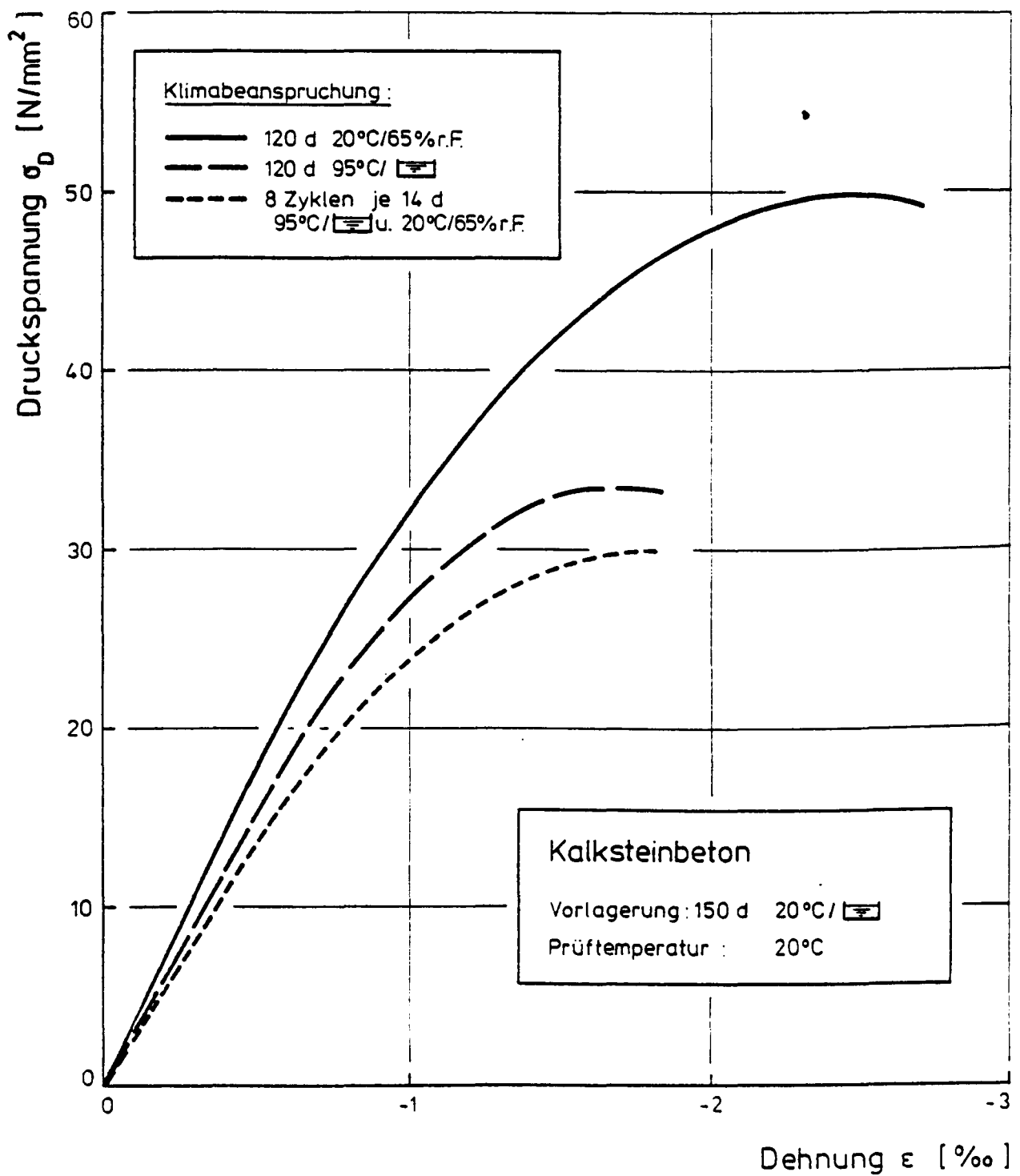


Abb. 41: Gegenüberstellung der σ/ϵ - Linien von Kalksteinbeton nach stationärer und zyklischer Klimaeinwirkung (Vorlagerung: 150d 20°C/☀)

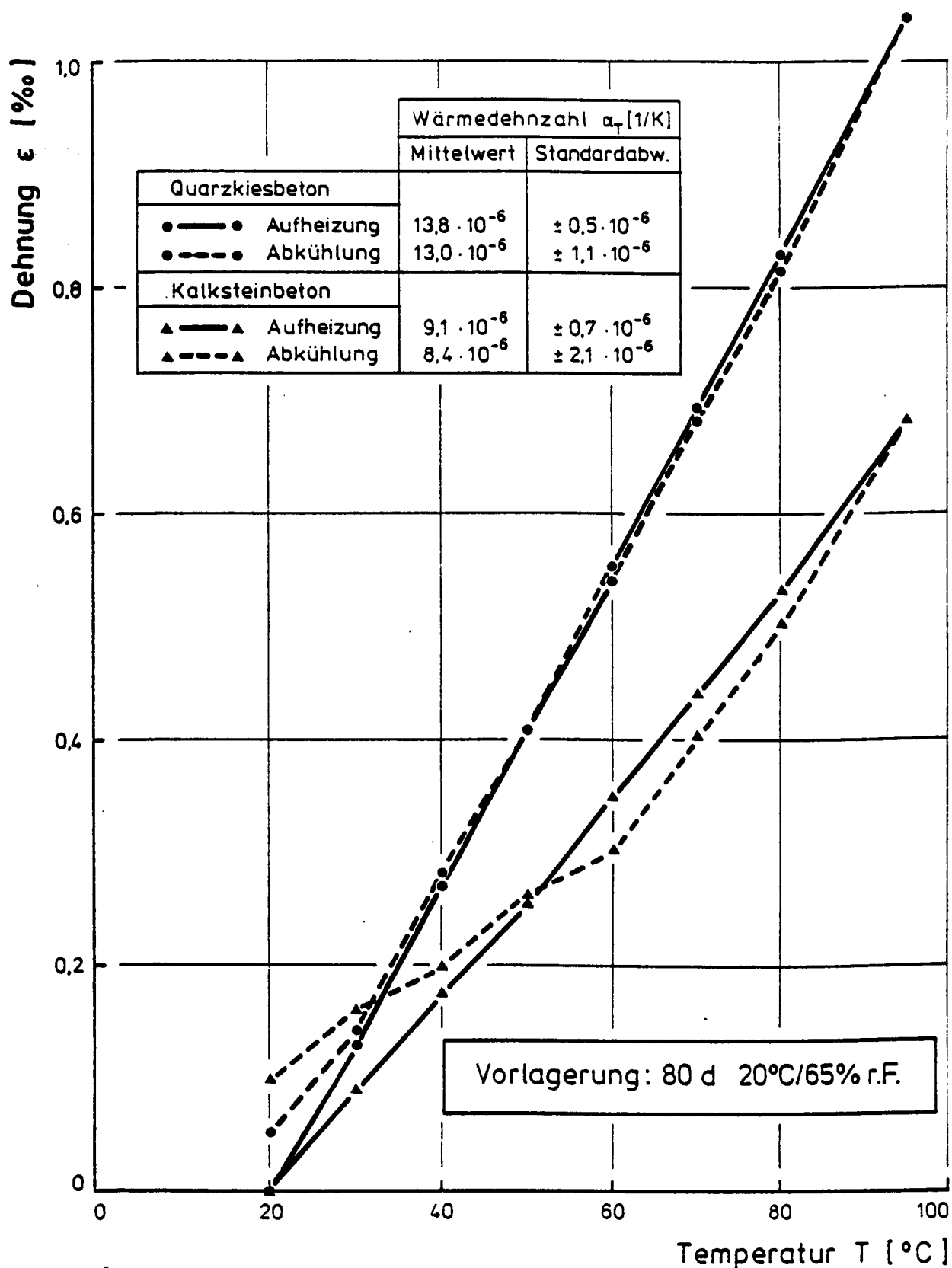


Abb. 42: Wärmedehnung von Beton bei Aufheizung und Abkühlung
(Vorlagerung: 80d 20°C/65%r.F.)

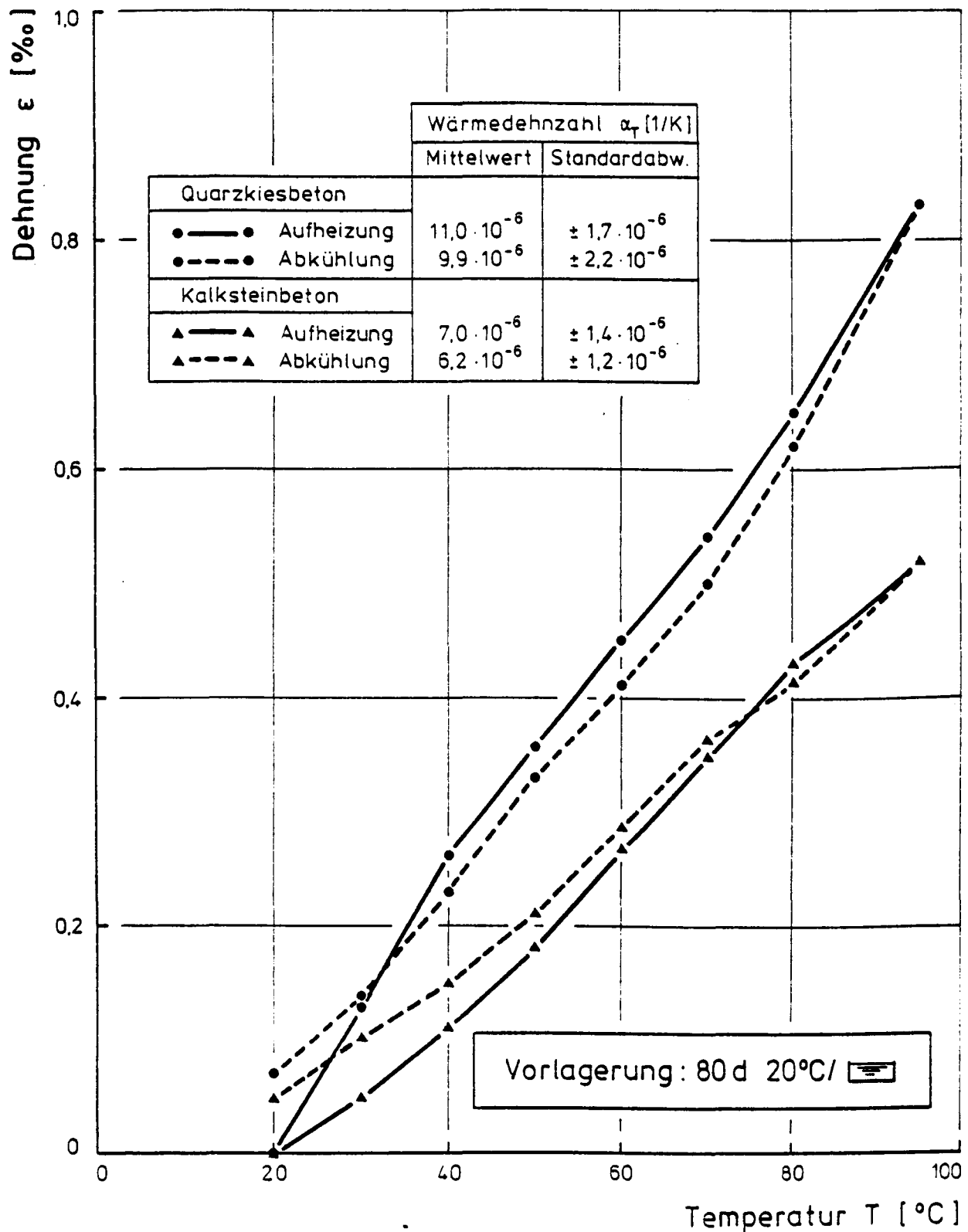


Abb. 43: Wärmedehnung von Beton bei Aufheizung und Abkühlung
(Vorlagerung: 80d 20°C/ [humidity symbol])

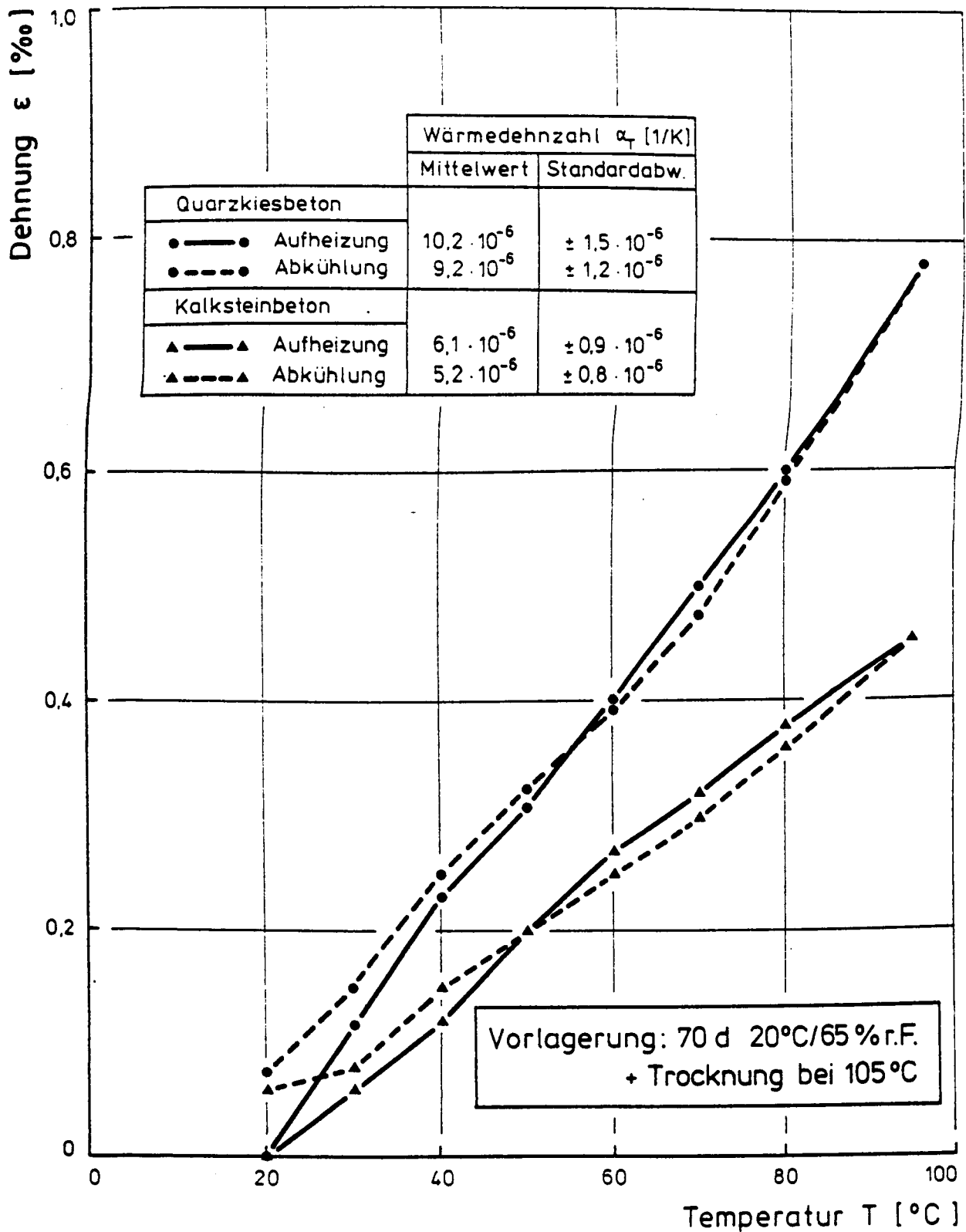


Abb. 44: Wärmedehnung von Beton bei Aufheizung und Abkühlung (Vorlagerung: 70d 20°C/65%r.F. und Trocknung bei 105°C)

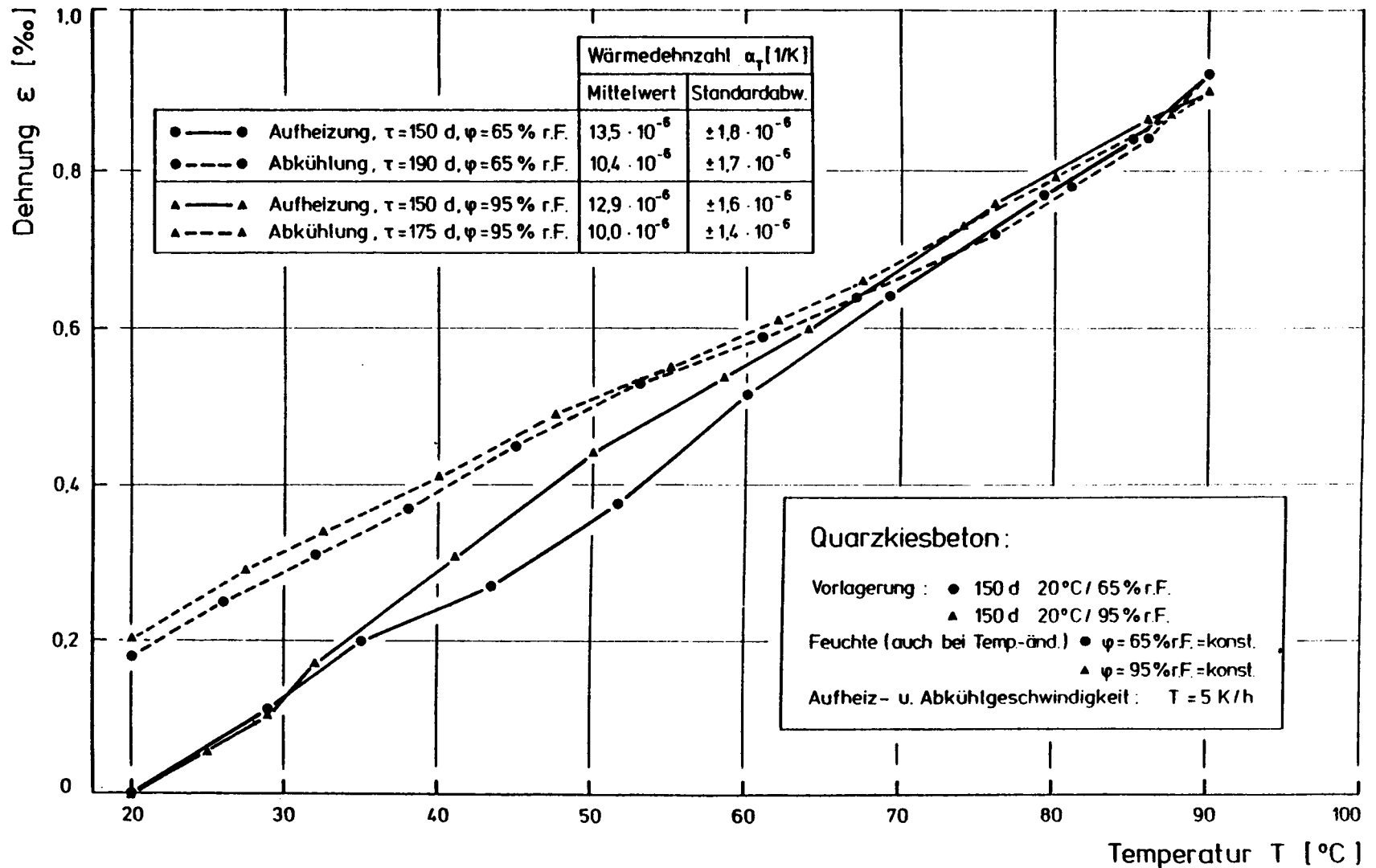


Abb. 45: Wärmedehnung von Quarzkiesbeton bei Aufheizung und Abkühlung nach längerer Temperaturhaltezeit bei $T=90^\circ\text{C}$ und $\varphi=65\%$ r.F. bzw. 95% r.F. = konst.

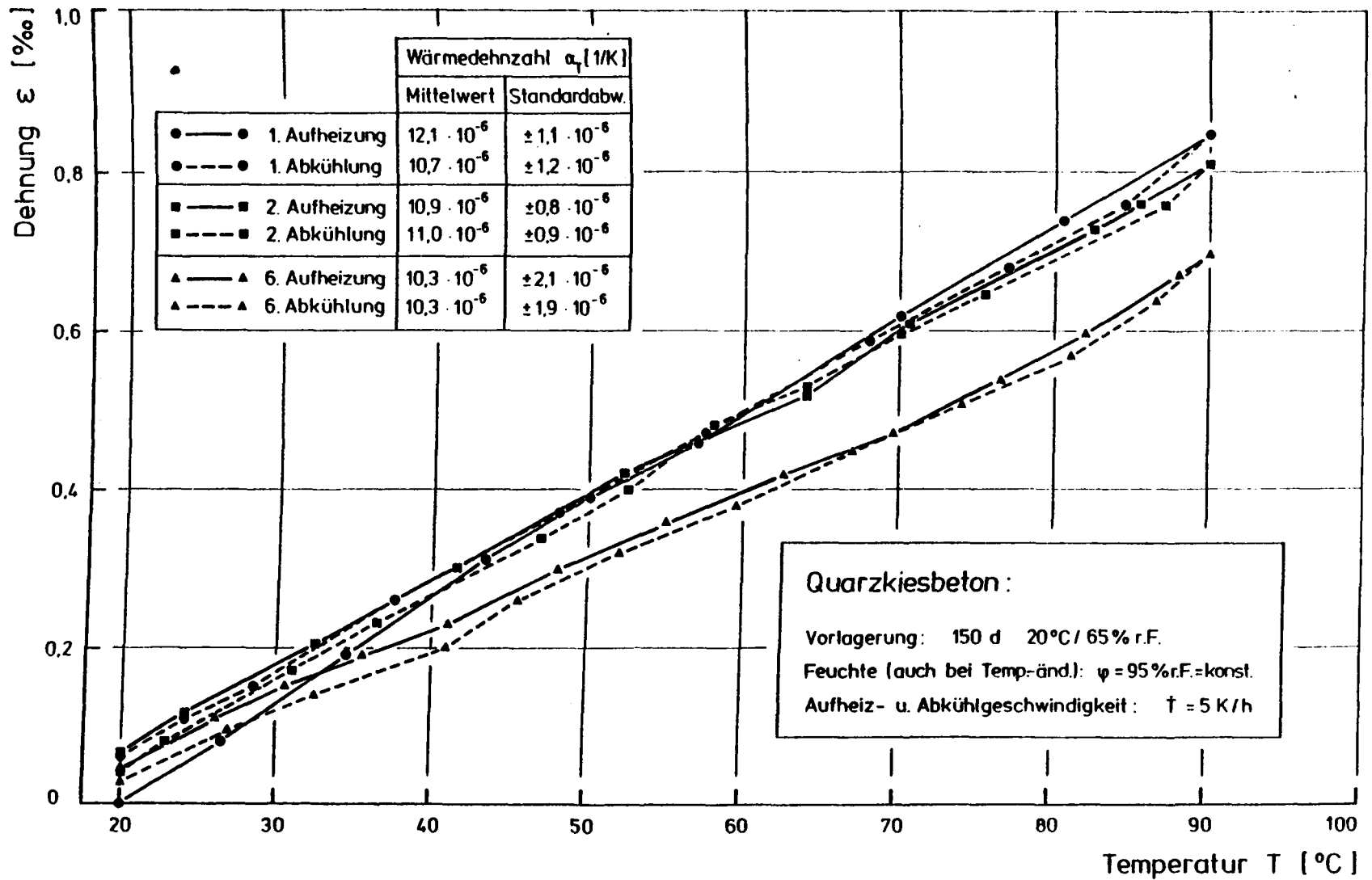


Abb. 46: Wärmedehnung von Quarzkiesbeton bei wiederholter Aufheizung auf $T=90^\circ\text{C}$
 $\varphi=95\% \text{ r.F.} = \text{konst.}$

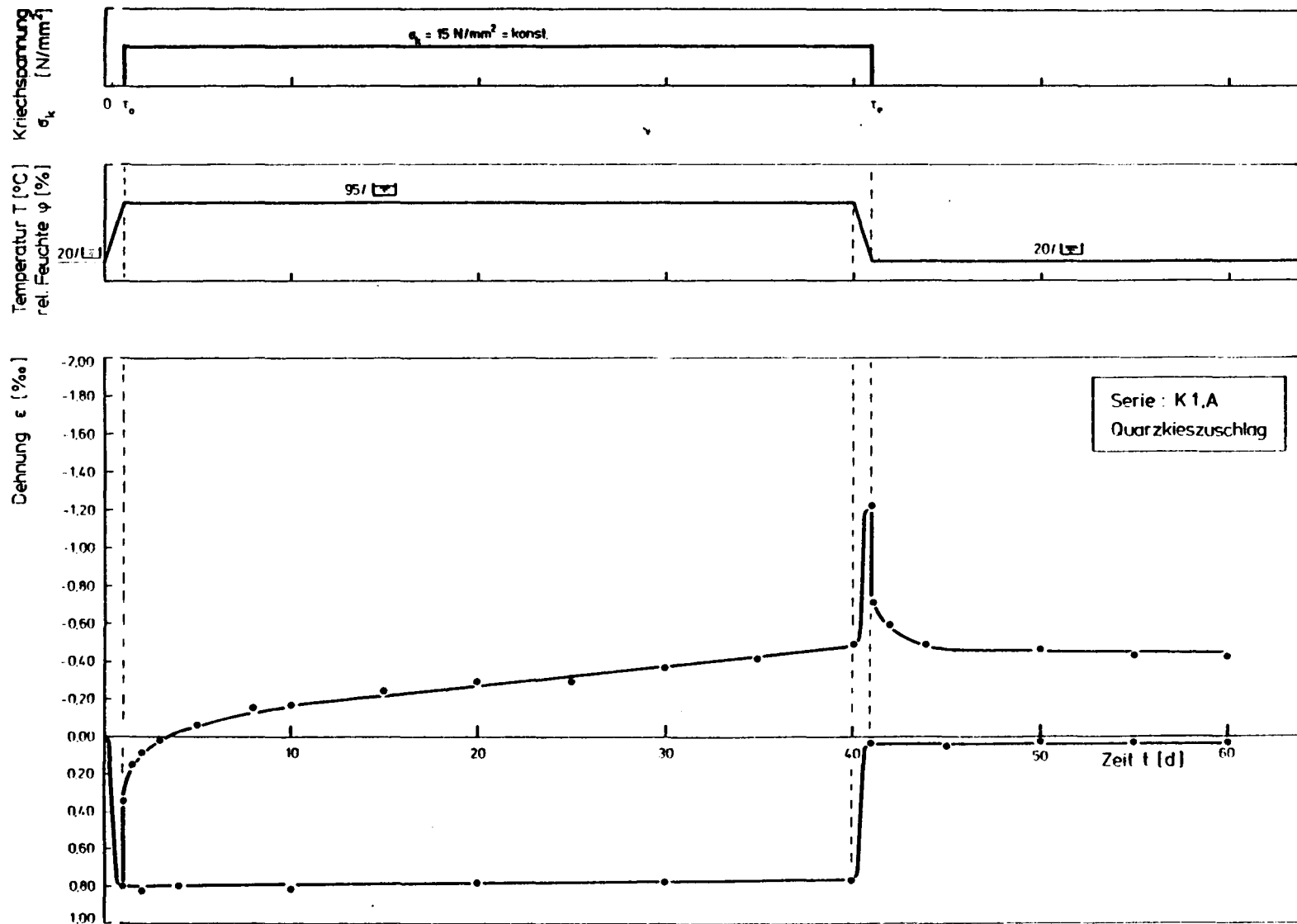



Abb. 47: Gesamtverformungen von Quarkiesbeton bei 95°C / , Bel.-zeitp.A (Serie K1,A)

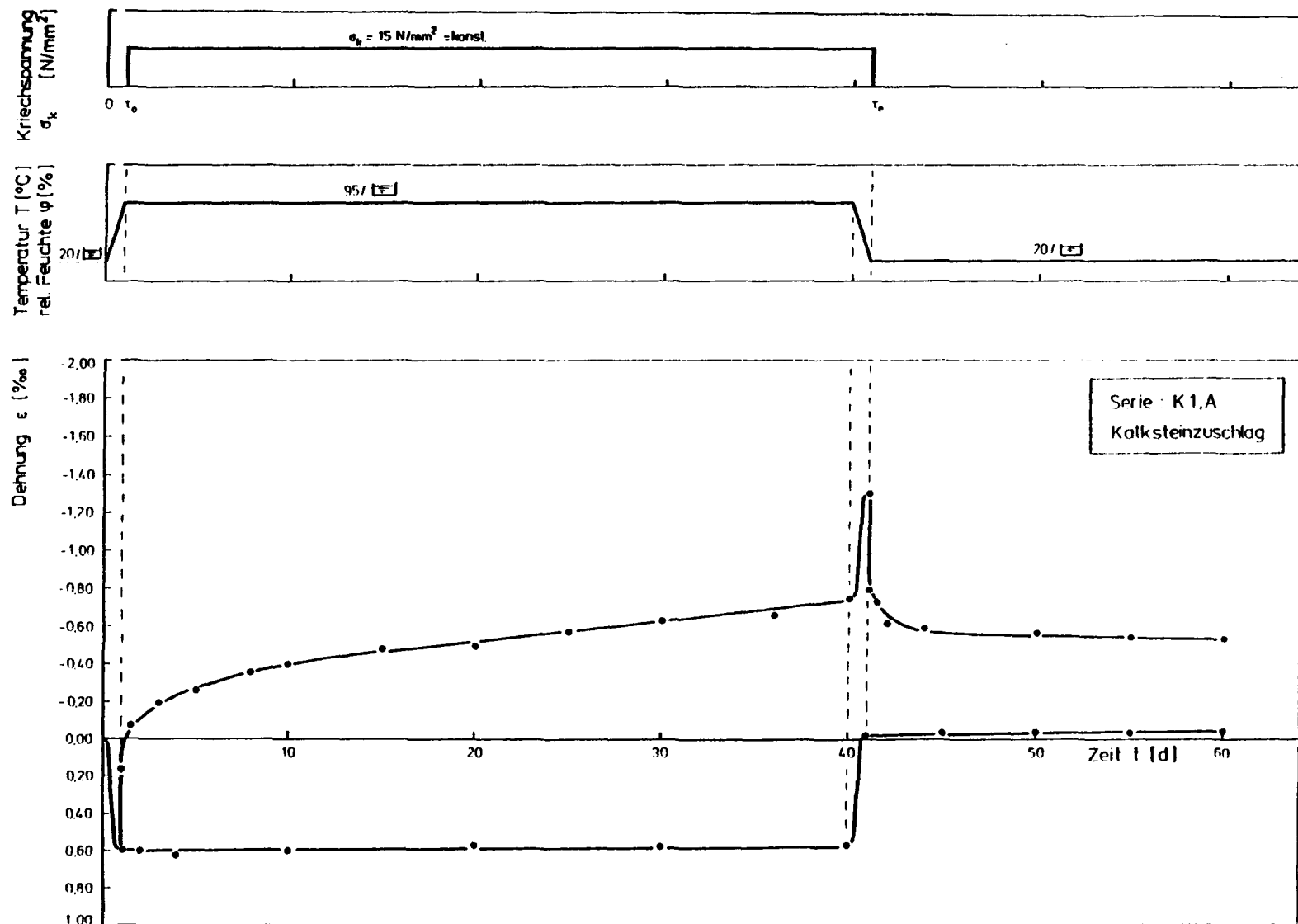


Abb. 48: Gesamtverformungen von Kalksteinbeton bei 95°C/75% , Bel.-zeitp. A
(Serie K1,A)

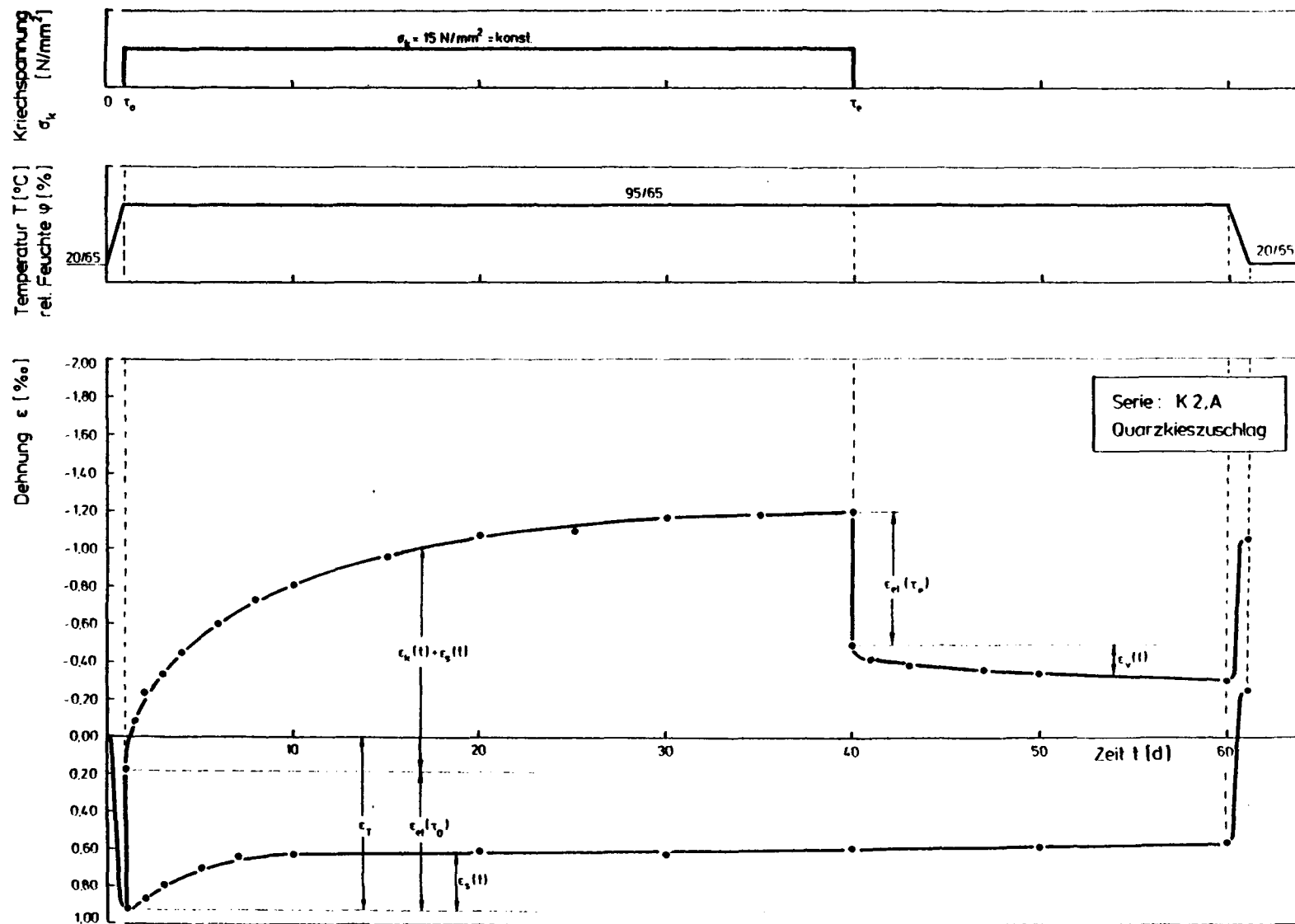


Abb. 49: Gesamtverformungen von Quarzkiesbeton bei 95°C/65%r.F.,
Bel.-zeitp. A (Serie K2,A)

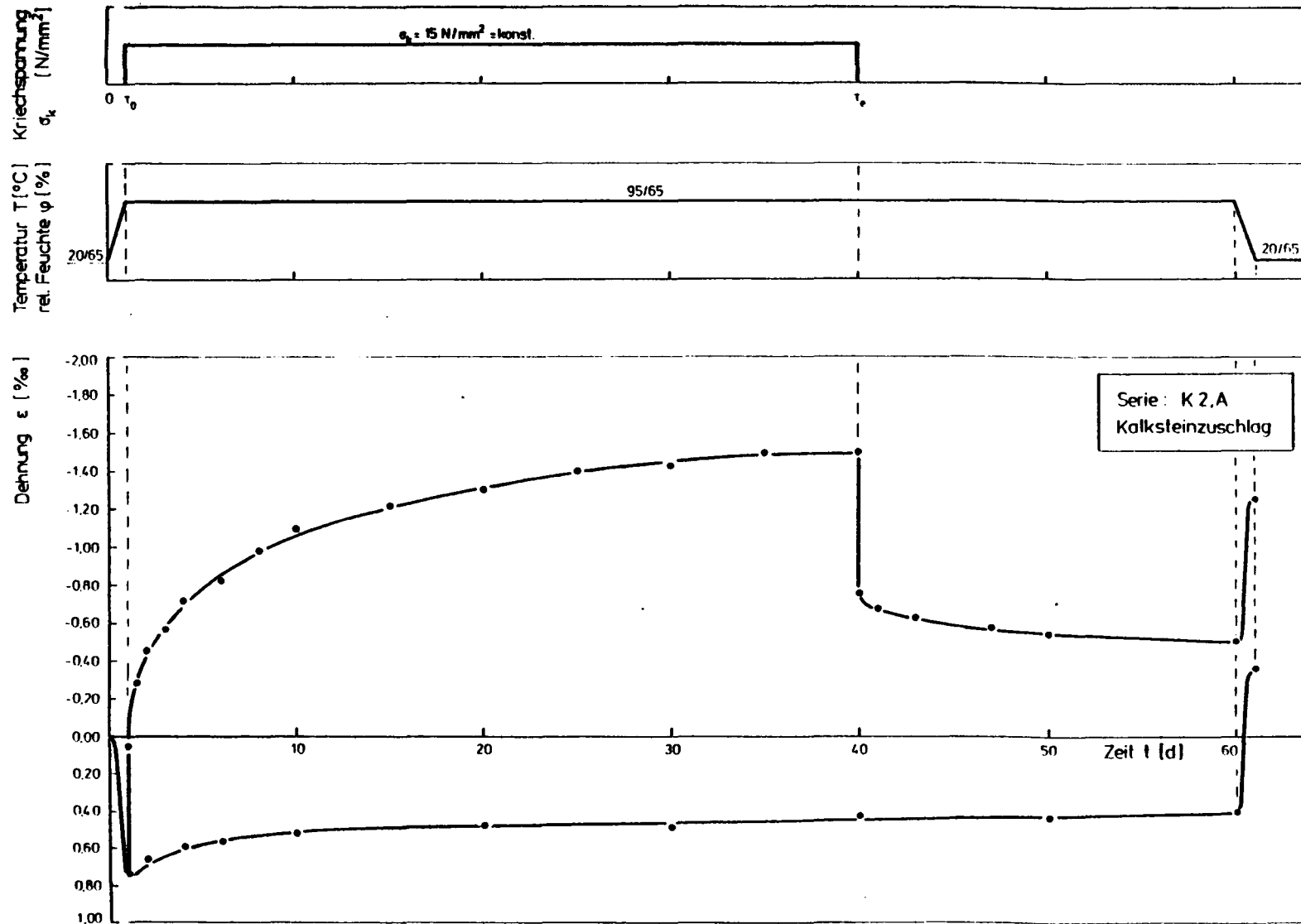


Abb. 50: Gesamtverformungen von Kalksteinbeton bei 95°C/65%r.F.,
Bel.-zeitp. A (Serie K2,A)

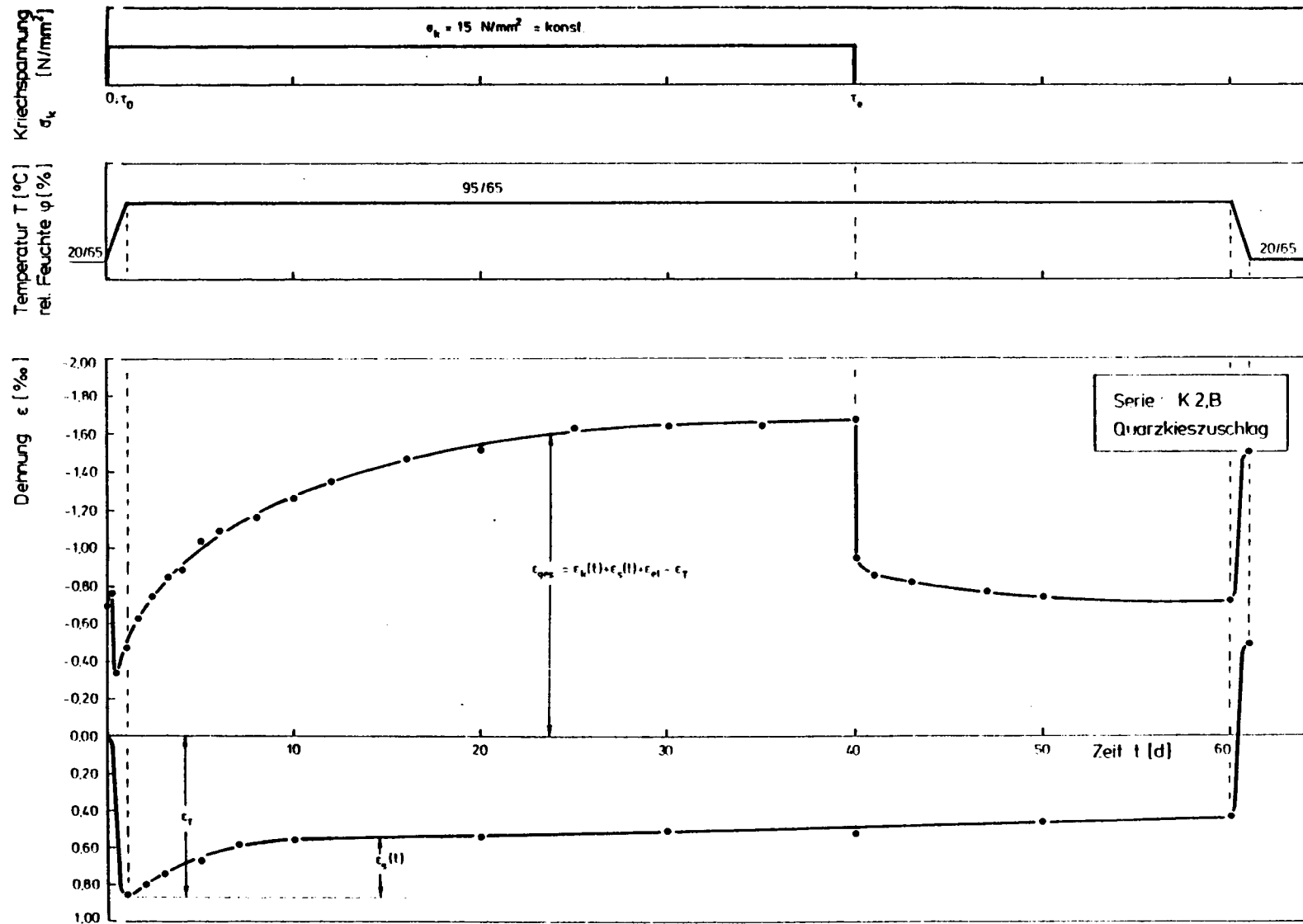


Abb. 51: Gesamtverformungen von Quarzkiesbeton bei 95°C/65%r.F.,
Bel.-zeitp. B (Serie K2,B)

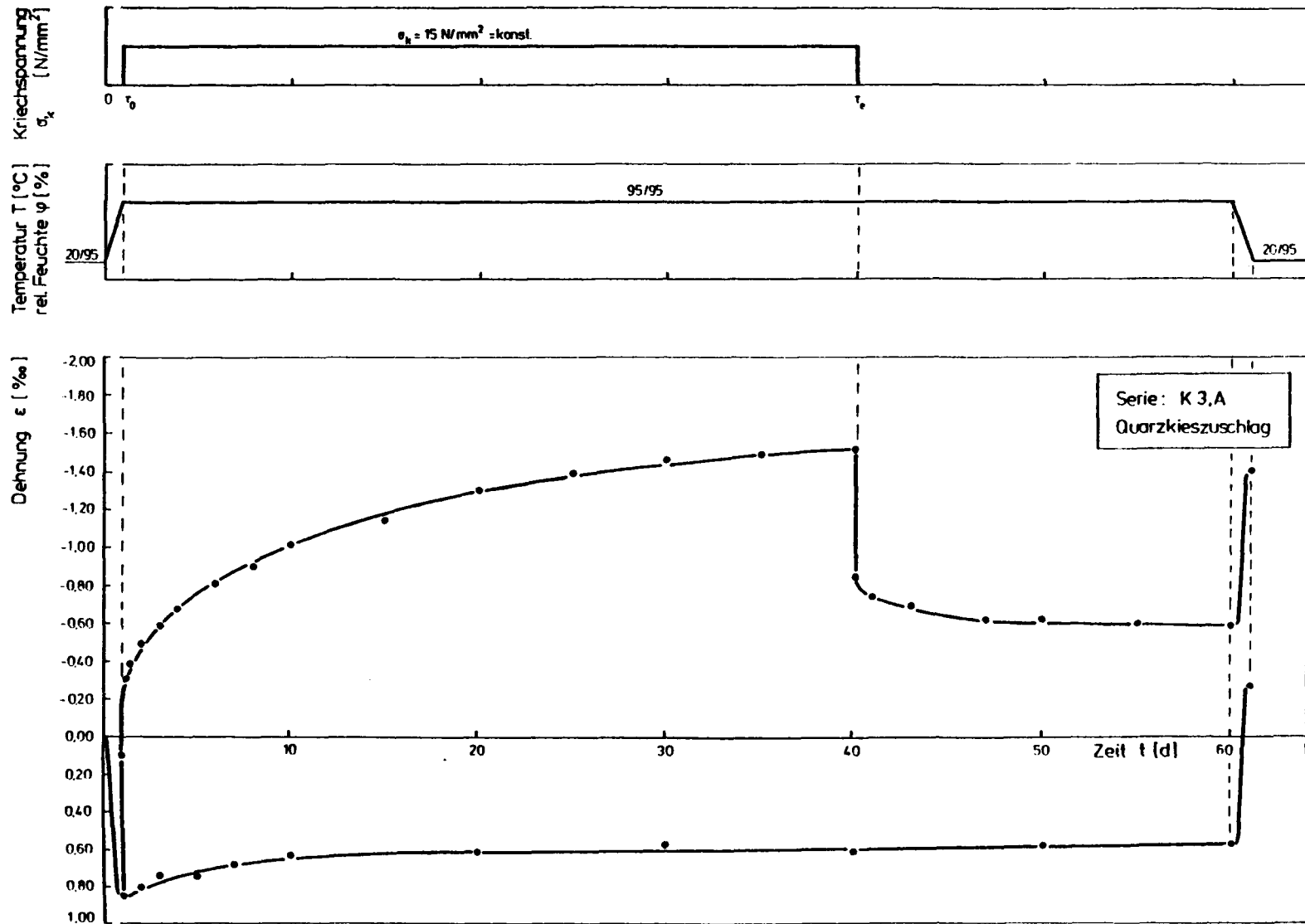


Abb. 52: Gesamtverformungen von Quarzkiesbeton bei 95°C/95%r.F.,
Bel.-zeitp. A (Serie K3,A)

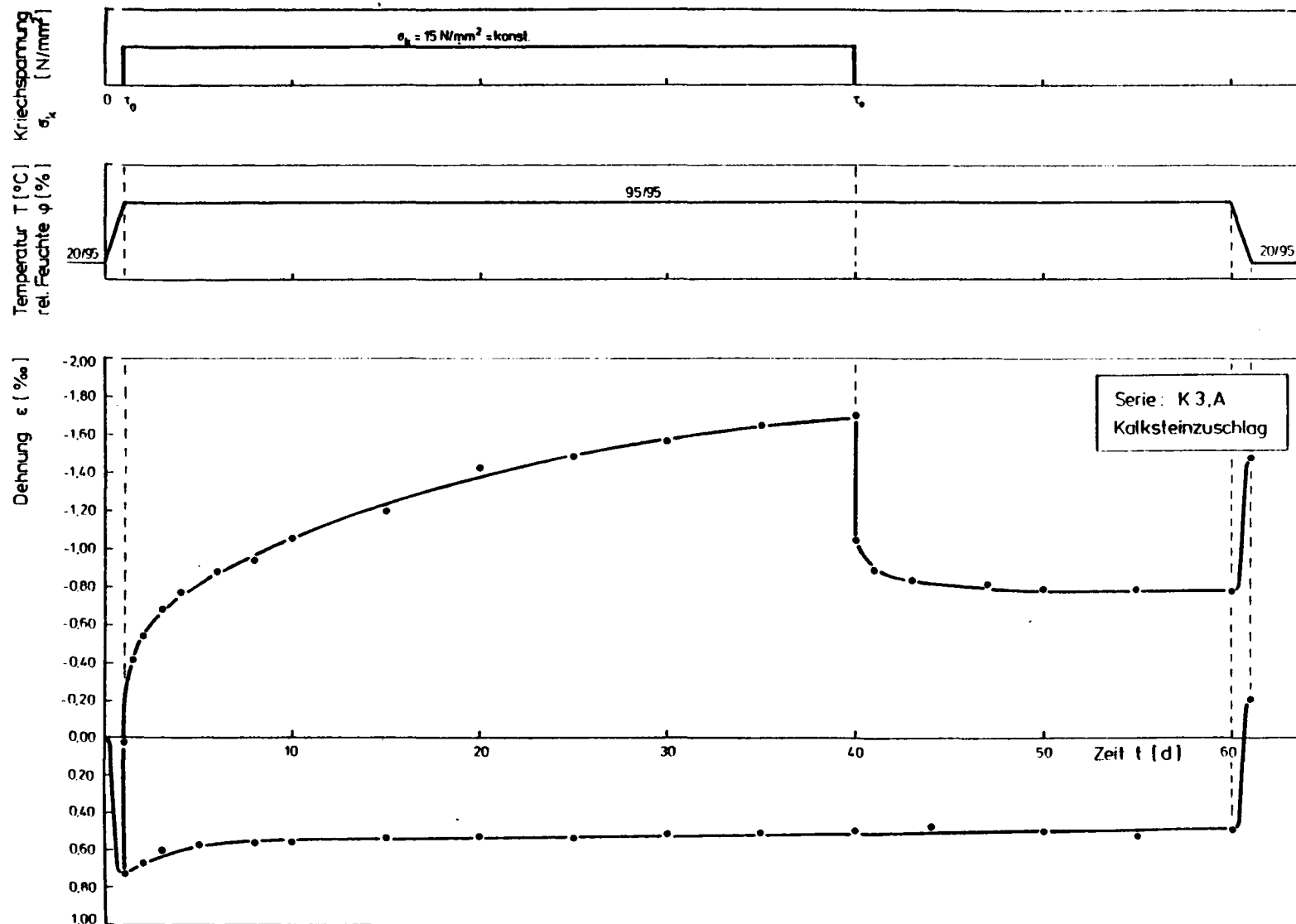


Abb. 53: Gesamtverformungen von Kalksteinbeton bei 95°C/95%r.F.,
Bel.-zeitp. A (Serie K3,A)

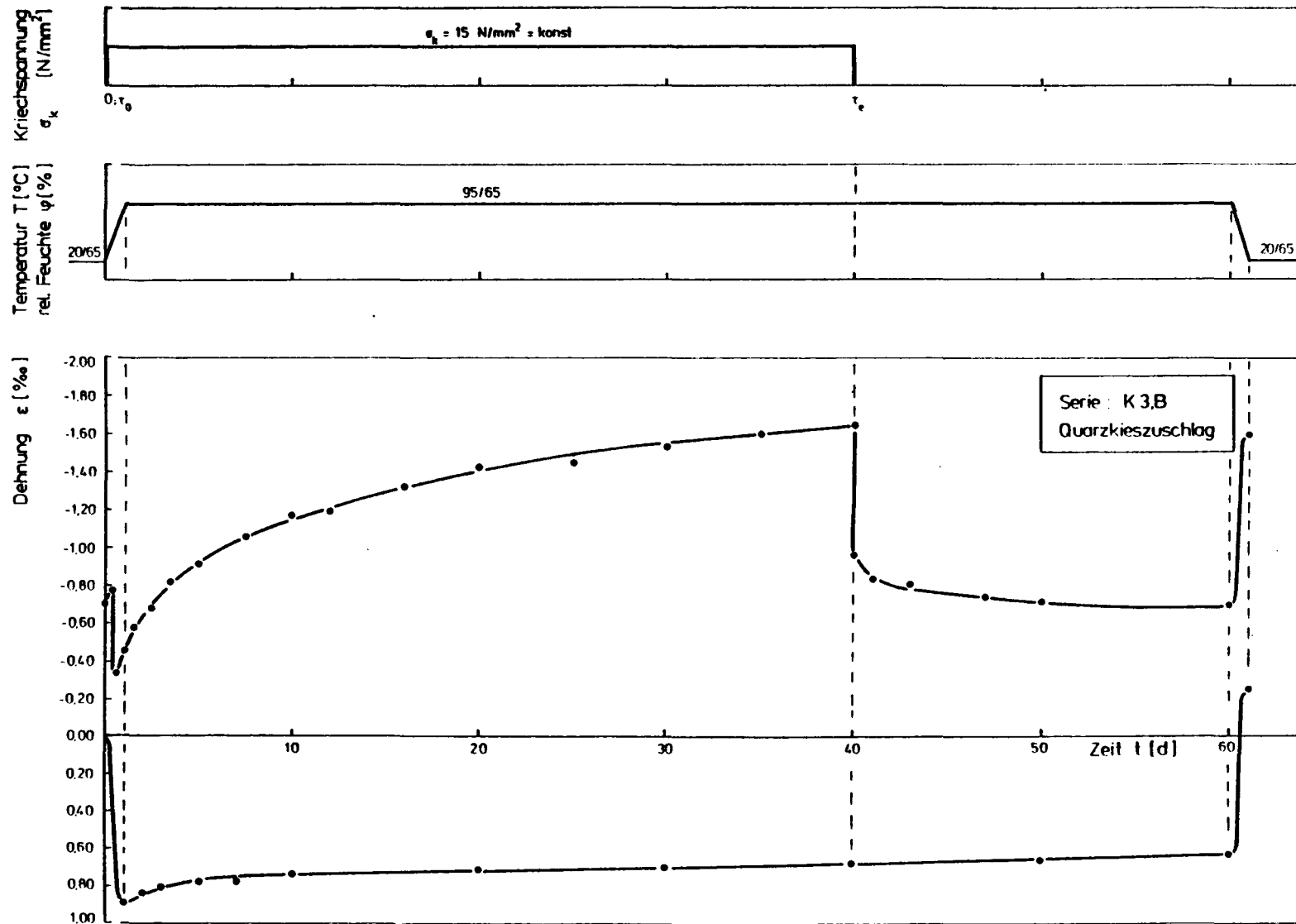


Abb. 54: Gesamtverformungen von Quarzkiesbeton bei 95°C/95%r.F.,
Bel.-zeitp. B (Serie K3,B)

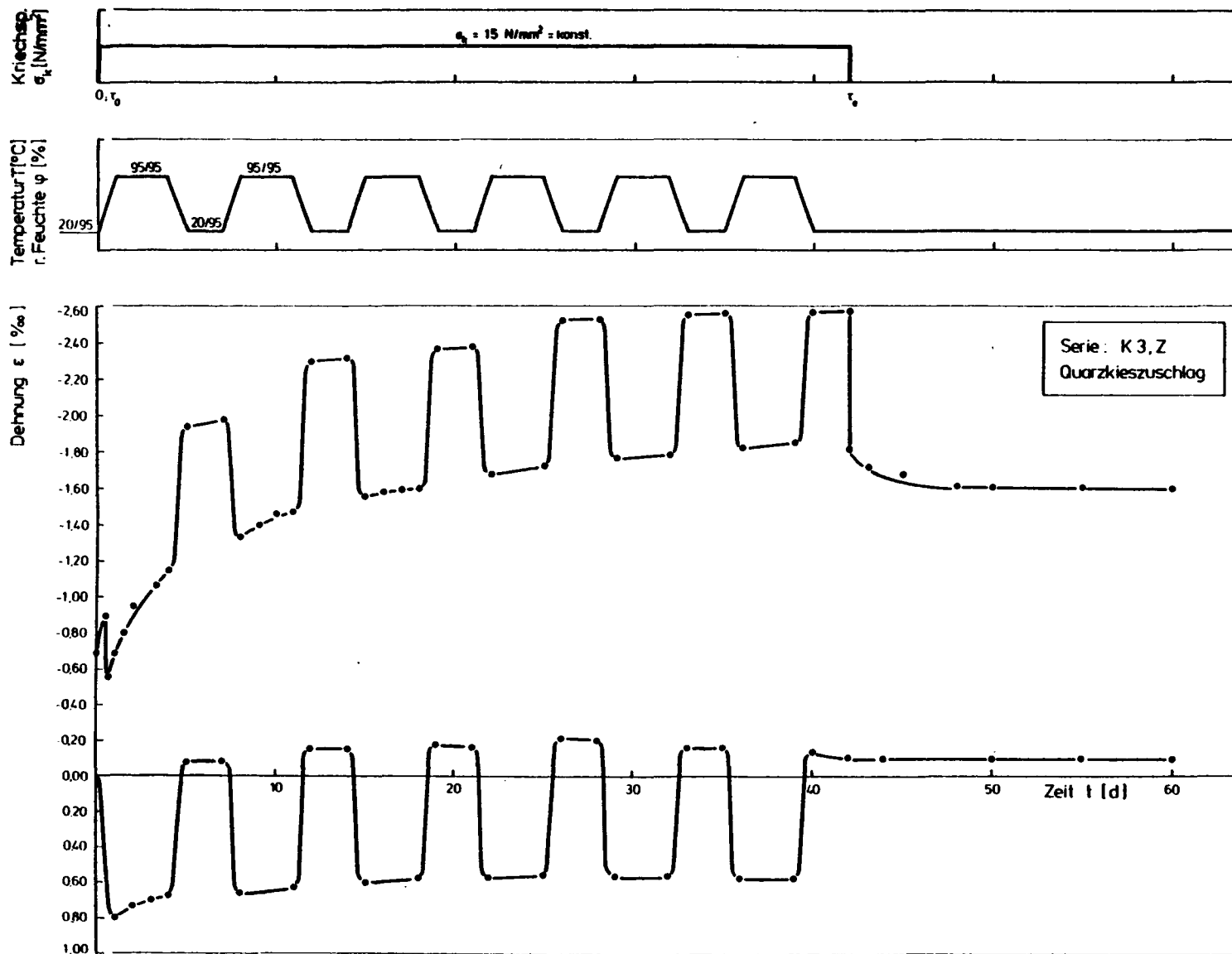


Abb. 55: Gesamtverformungen von Quarzkiesbeton bei Zyklen 95°C/95%r.F. und 20°C/95%r.F. (Serie K3,Z)

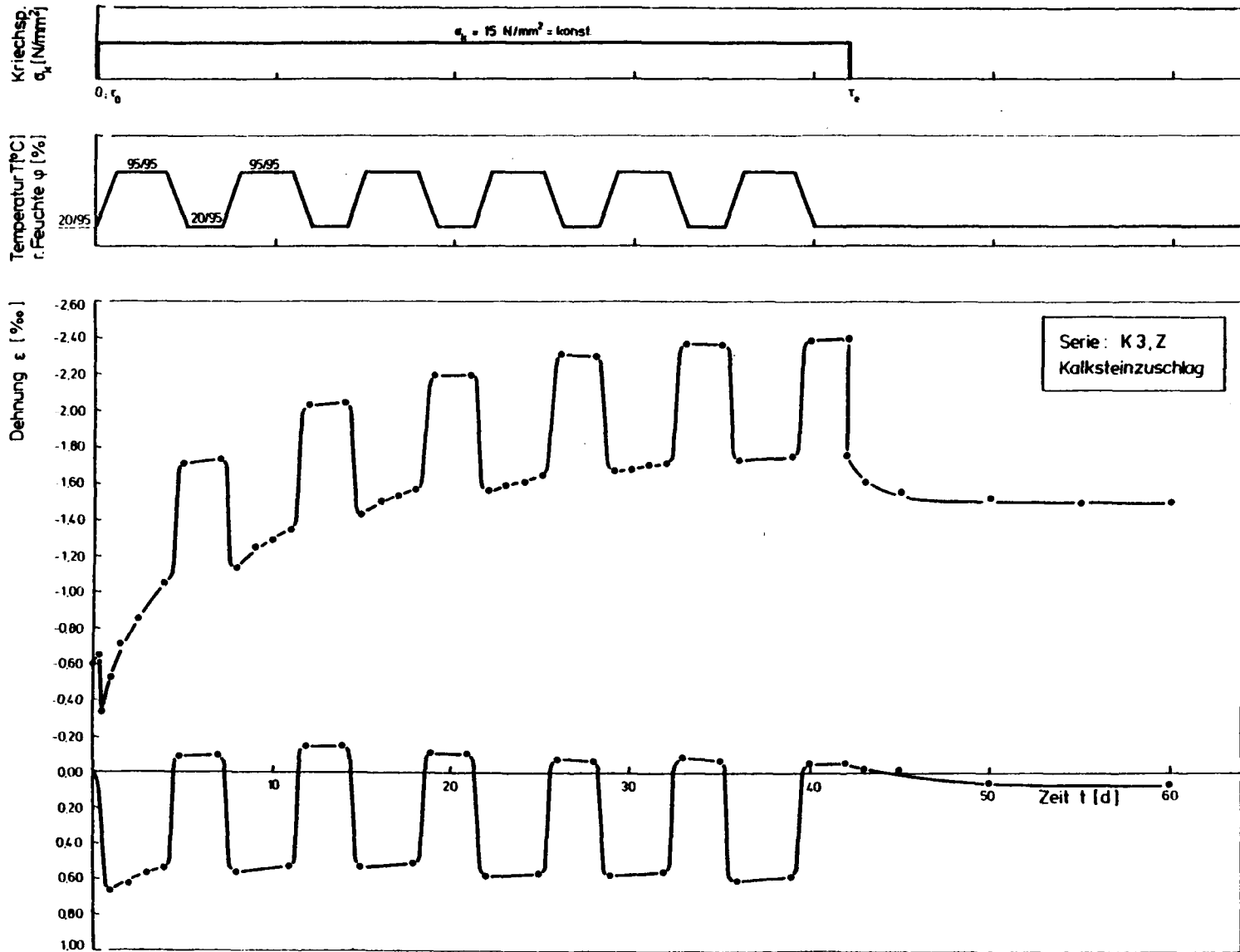


Abb. 56: Gesamtverformungen von Kalksteinbeton bei Zyklen 95°C/95%r.F. und 20°C/95%r.F. (Serie K3,Z)

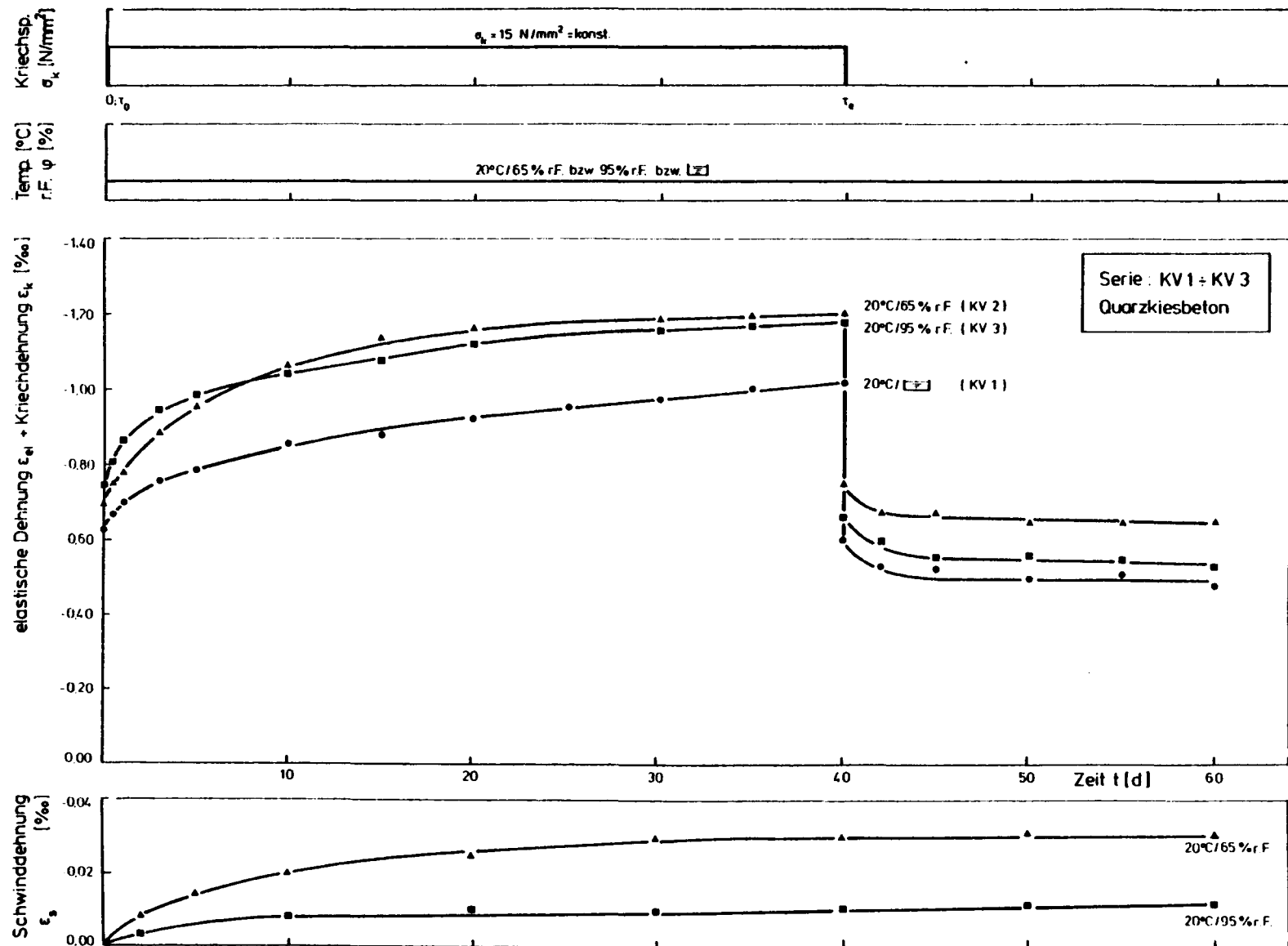


Abb. 57: Gesamtverformungen von Quarzkiesbeton bei 20°C/65% r.F. (Serie KV1), 20°C/95% r.F. (Serie KV2) und 20°C/65% r.F. (Serie KV3)

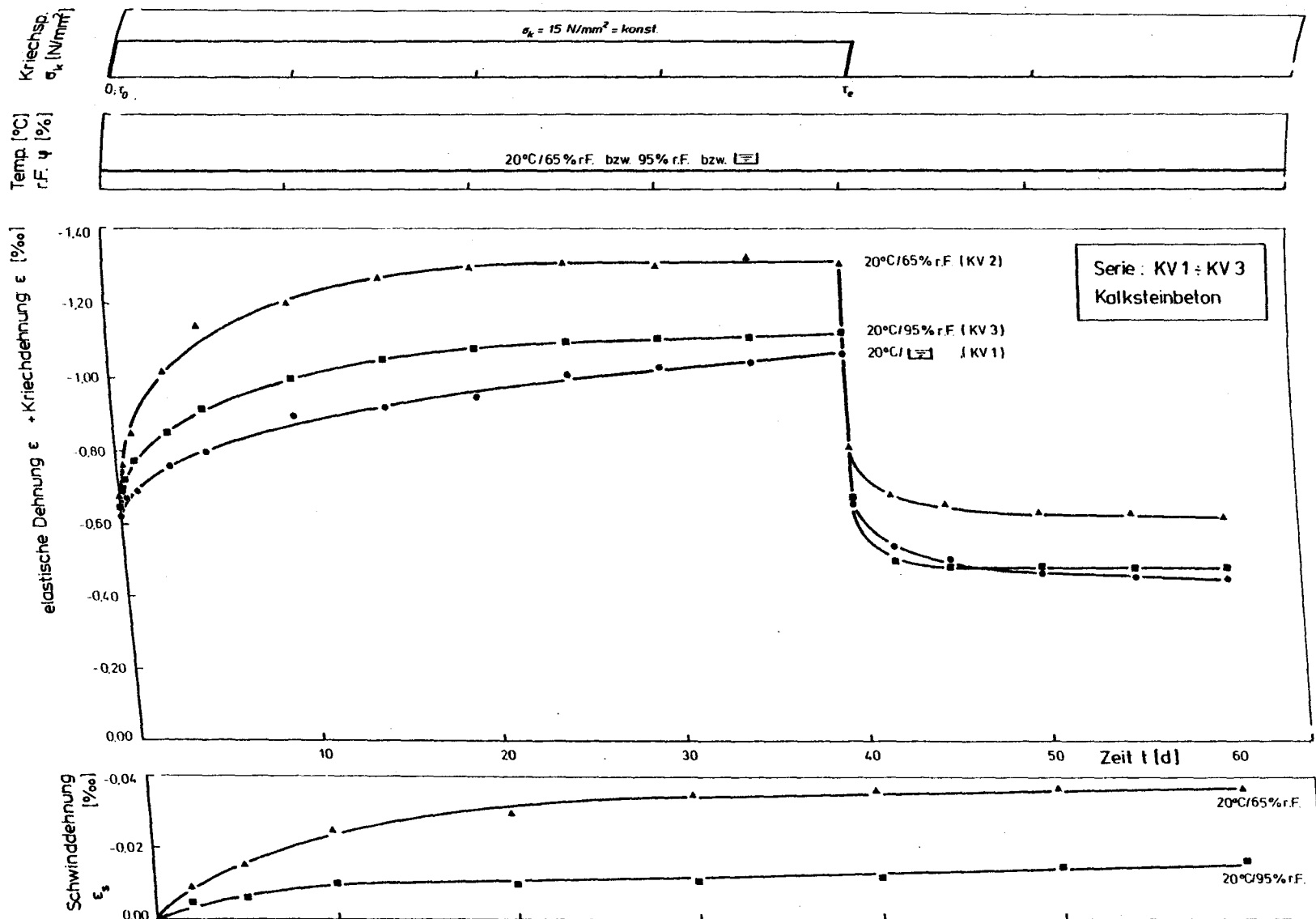


Abb. 58: Gesamtverformungen von Kalksteinbeton bei 20°C/ φ (Serie KV1), 20°C/65%r.F. (Serie KV2) und 20°C/95%r.F. (Serie KV3)

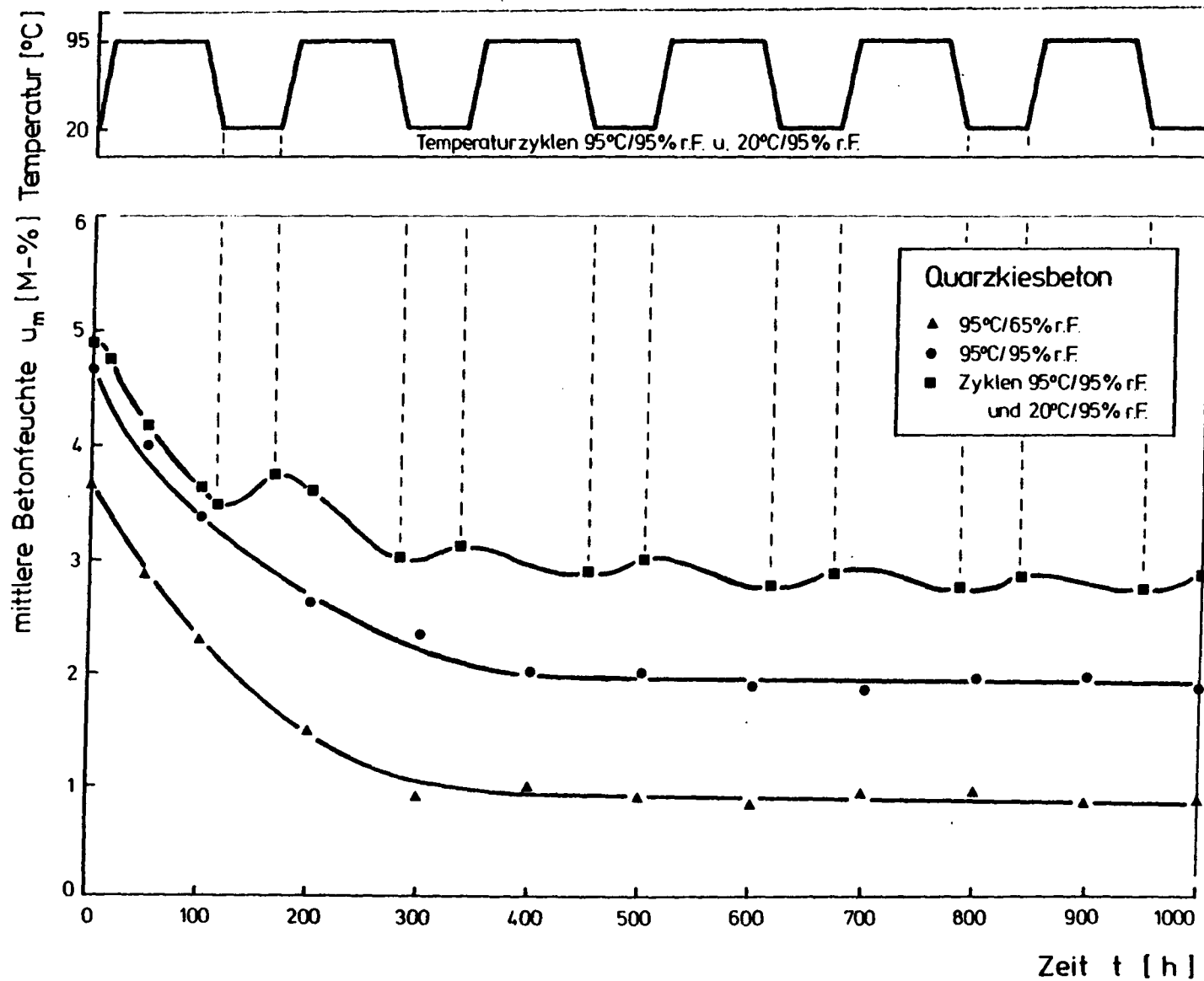


Abb. 59: Gewichtsverluste durch Trocknung während der Kriechversuche für Quarzkiesbeton

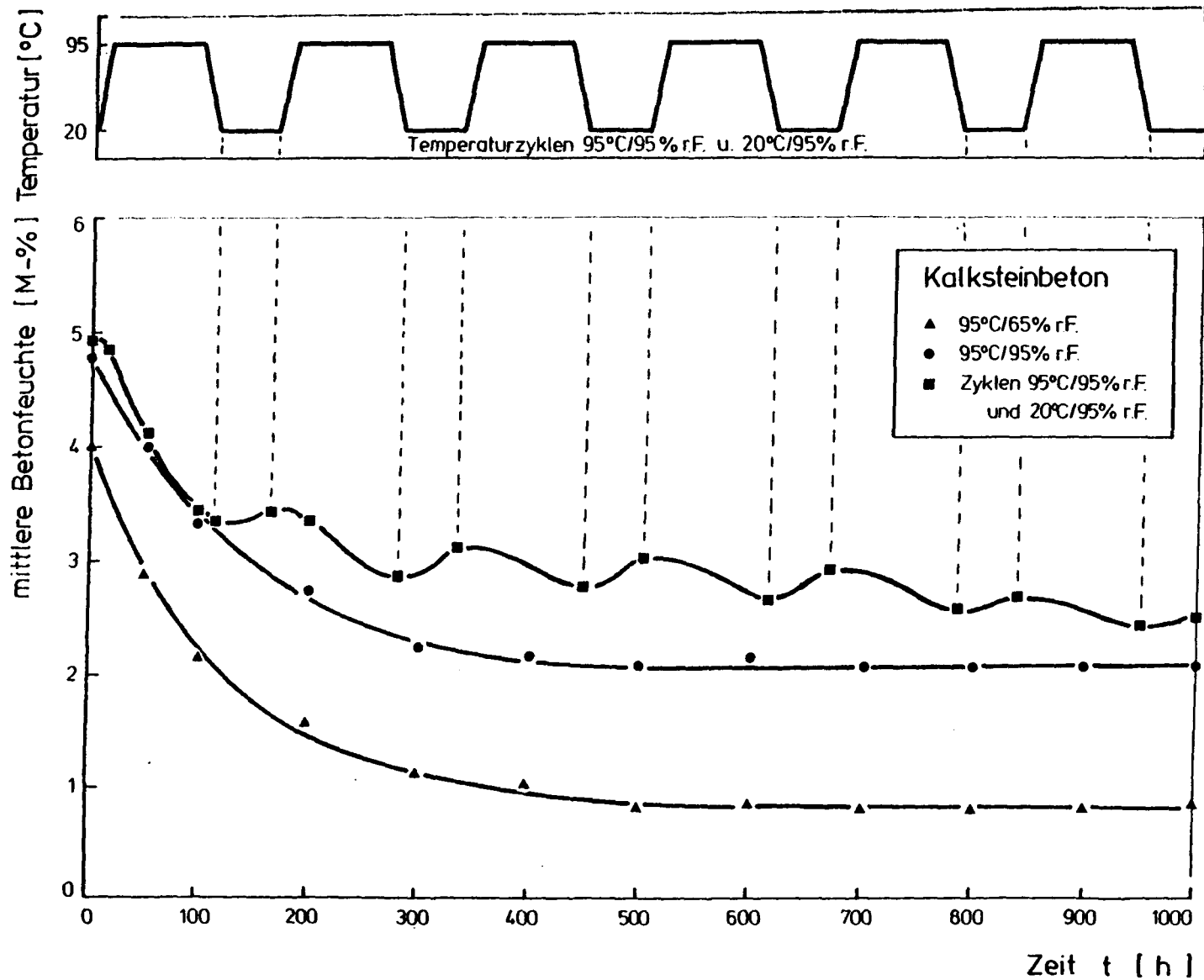


Abb. 60: Gewichtsverluste durch Trocknung während der Kriechversuche für Kalksteinbeton

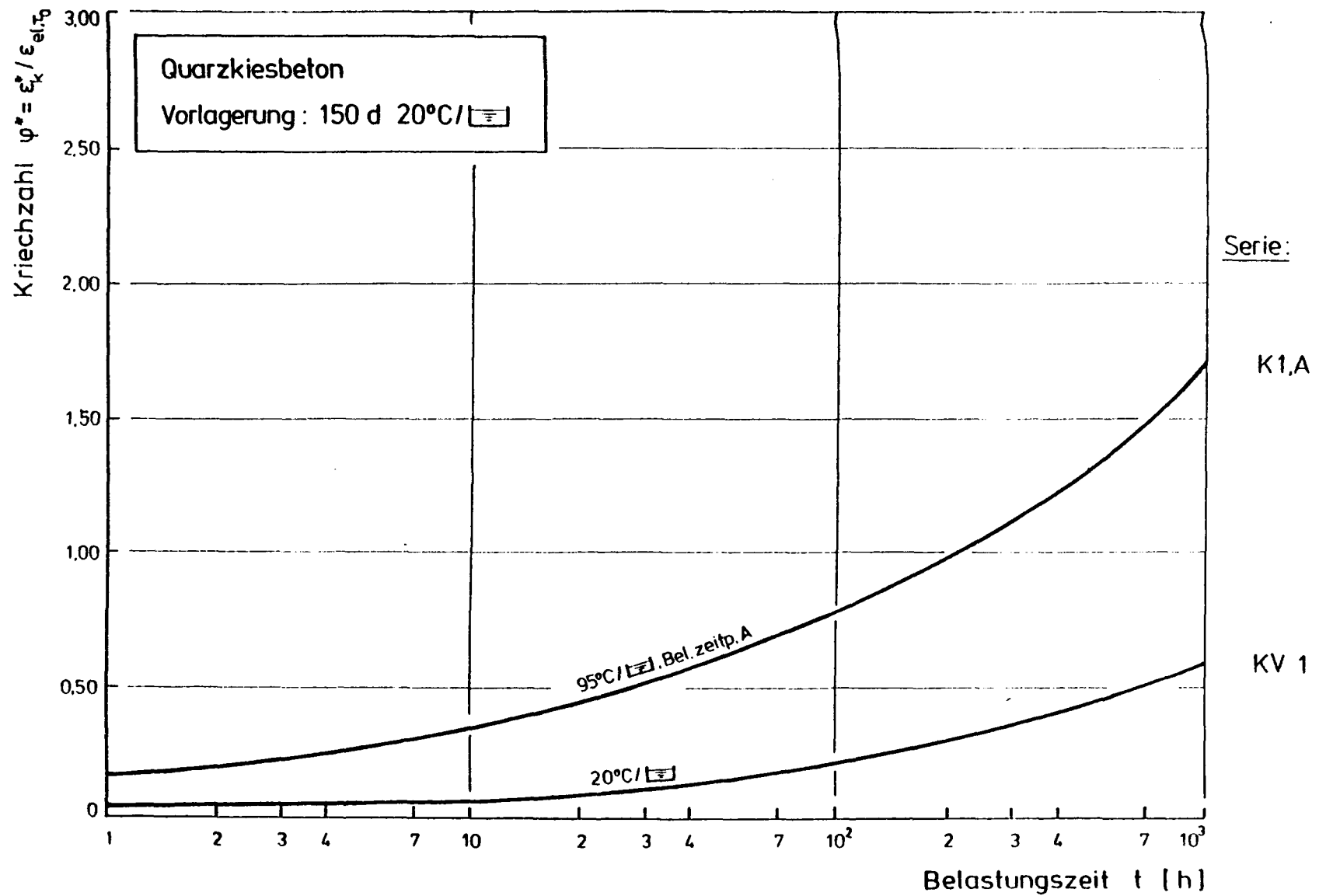




Abb. 61: Zeitliche Entwicklung der Kriechzahl φ^* für Quarzkiesbeton bei 95°C /  und 20°C / 

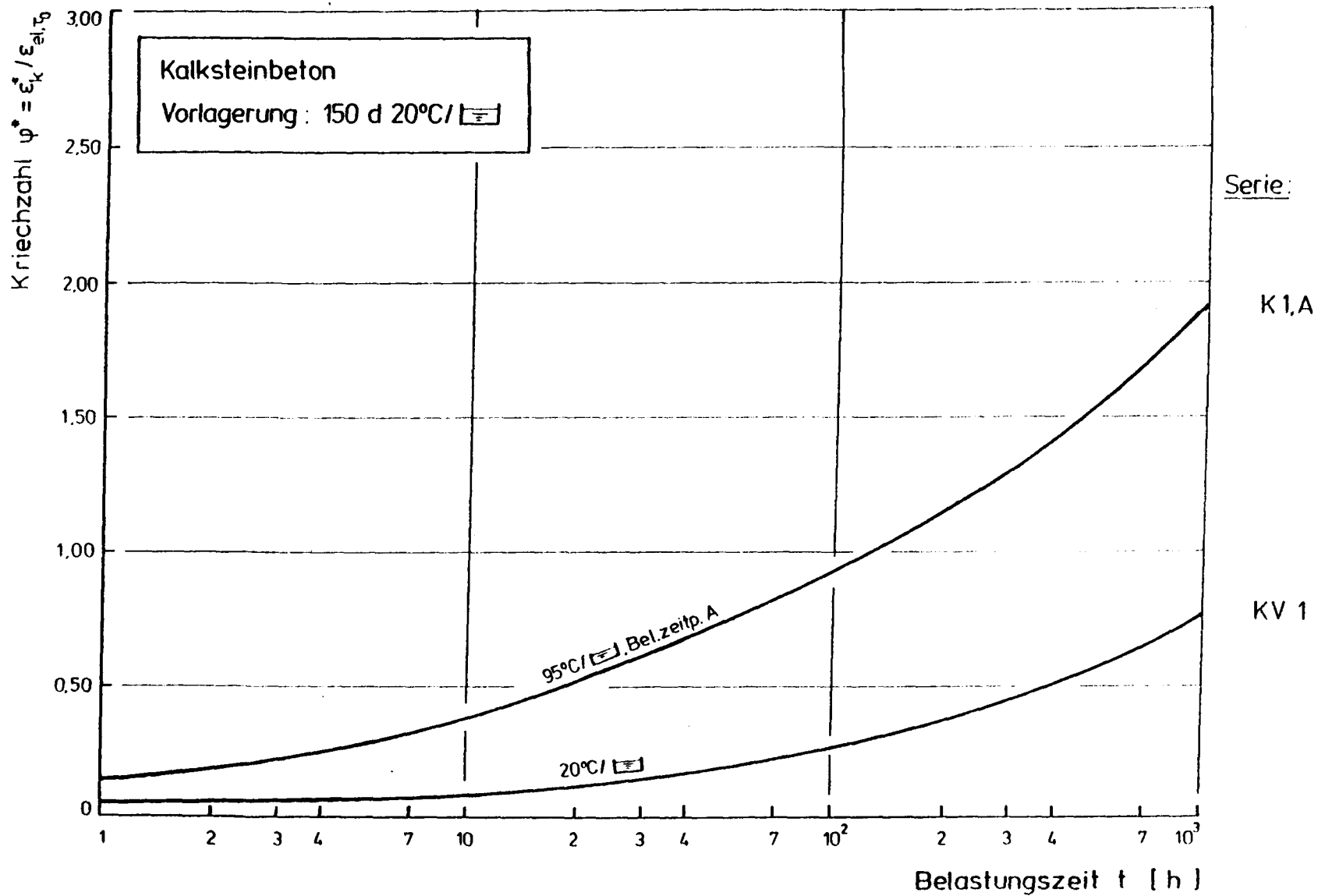


Abb. 62: Zeitliche Entwicklung der Kriechzahl φ^* für Kalksteinbeton bei 95°C / [☐] und 20°C / [☐]

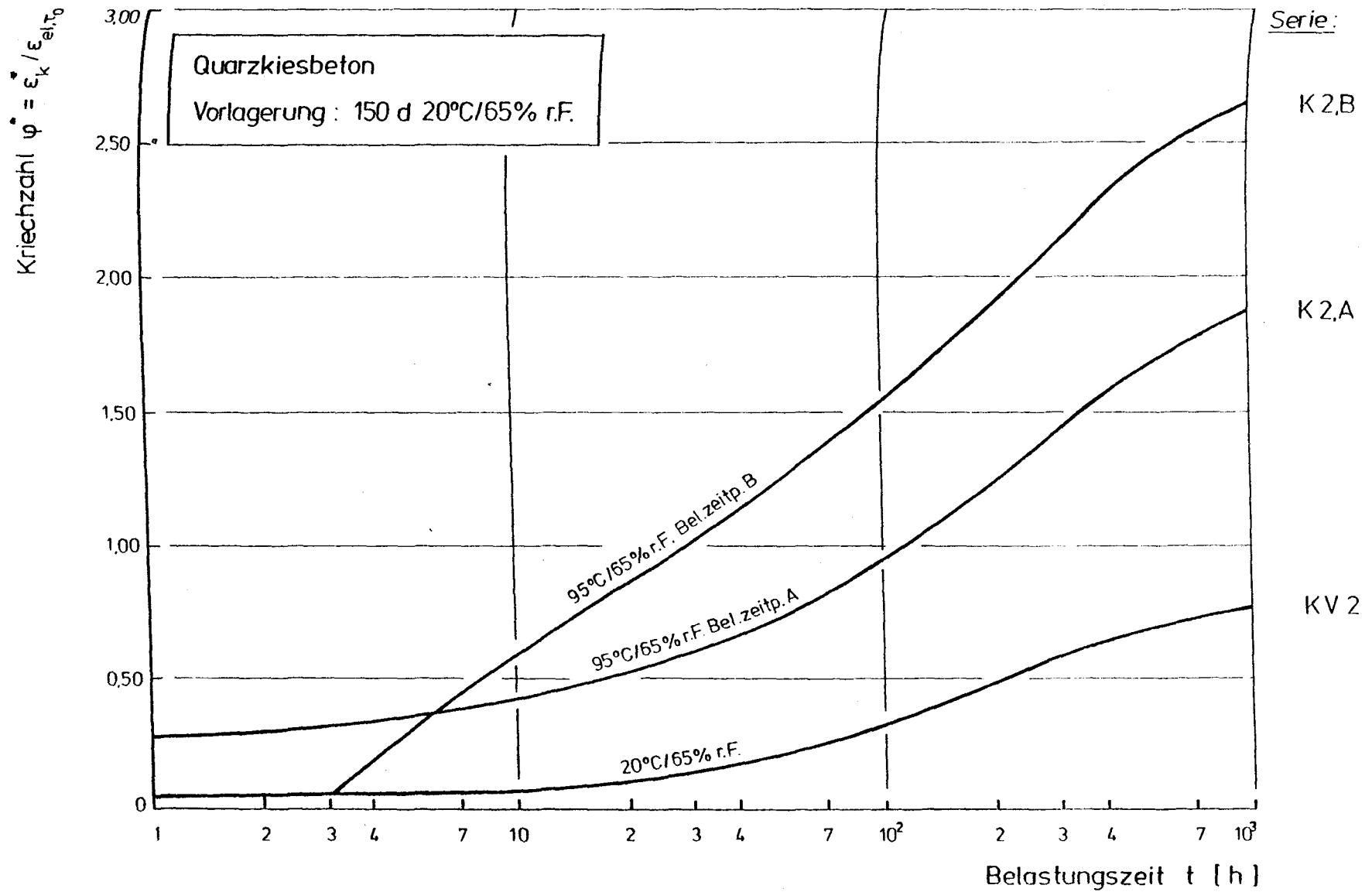


Abb. 63: Zeitliche Entwicklung der Kriechzahl $\dot{\varphi}^*$ für Quarkiesbeton bei 95°C/65%r.F. und 20°C/65%r.F.

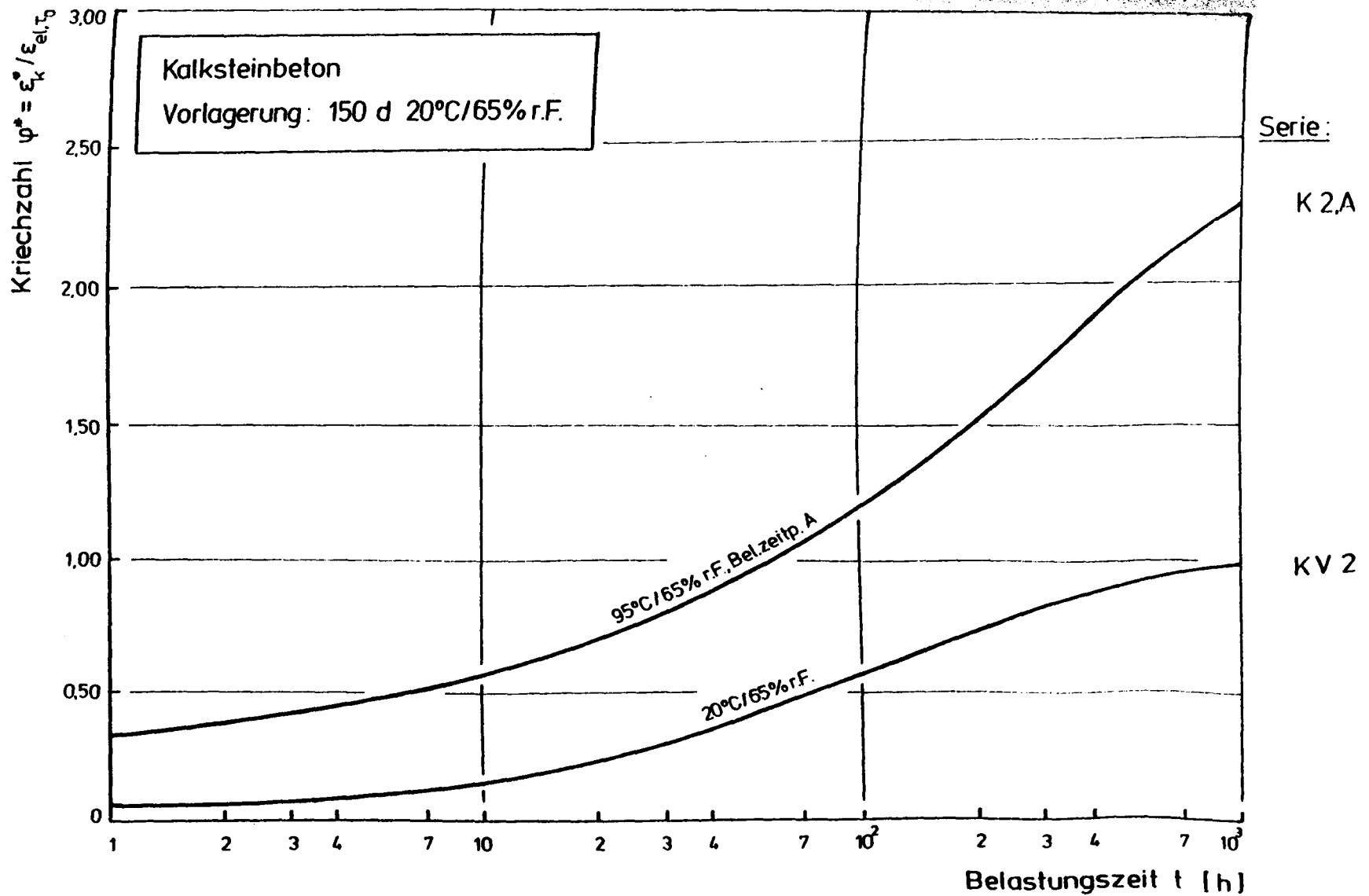


Abb. 64: Zeitliche Entwicklung der Kriechzahl φ^* für Kalksteinbeton bei 95°C/65%r.F. und 20°C/65%r.F.

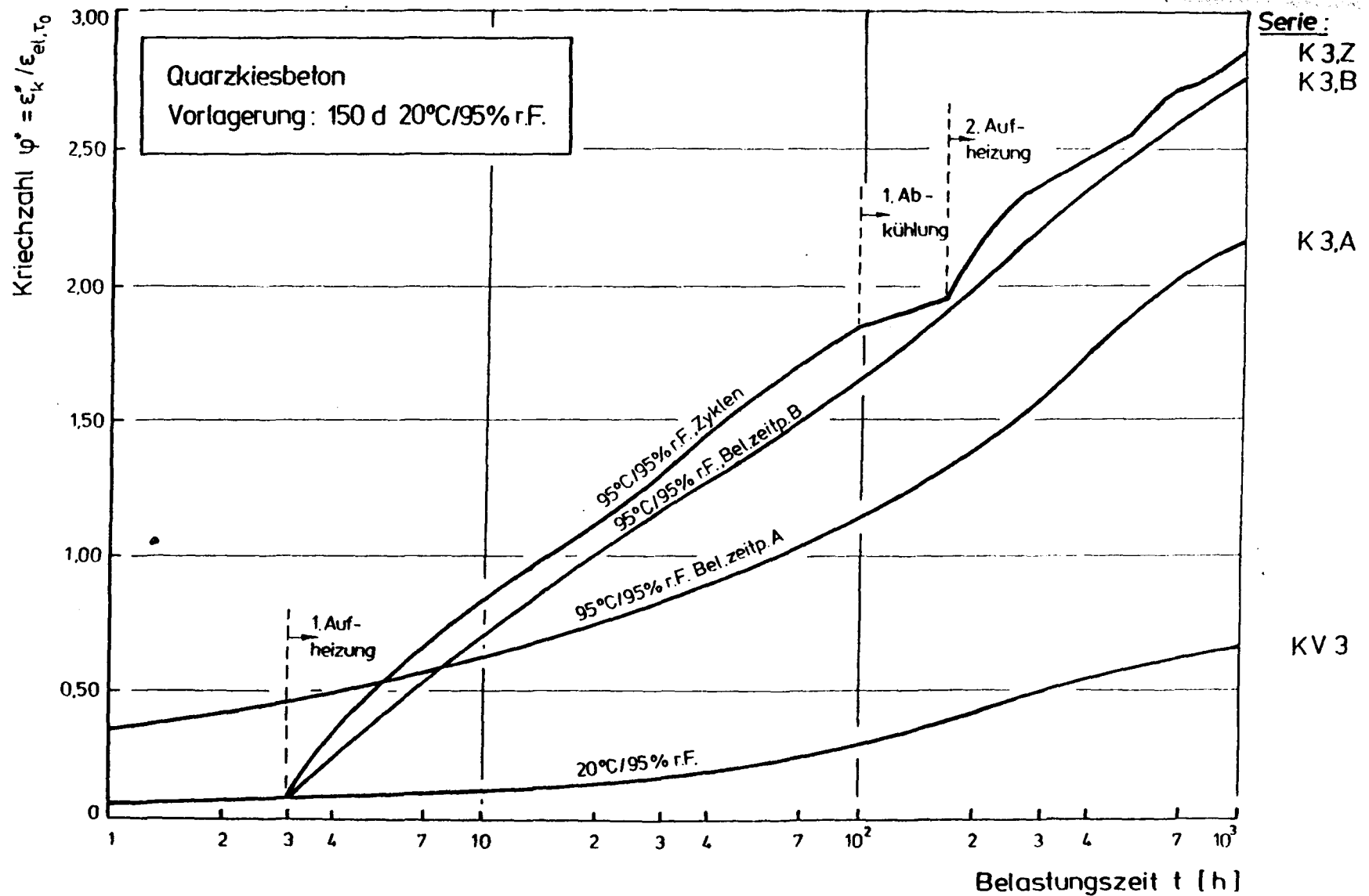


Abb. 65: Zeitliche Entwicklung der Kriechzahl φ^* für Quarzkiesbeton bei 95°C/95%r.F. und 20°C/95%r.F.

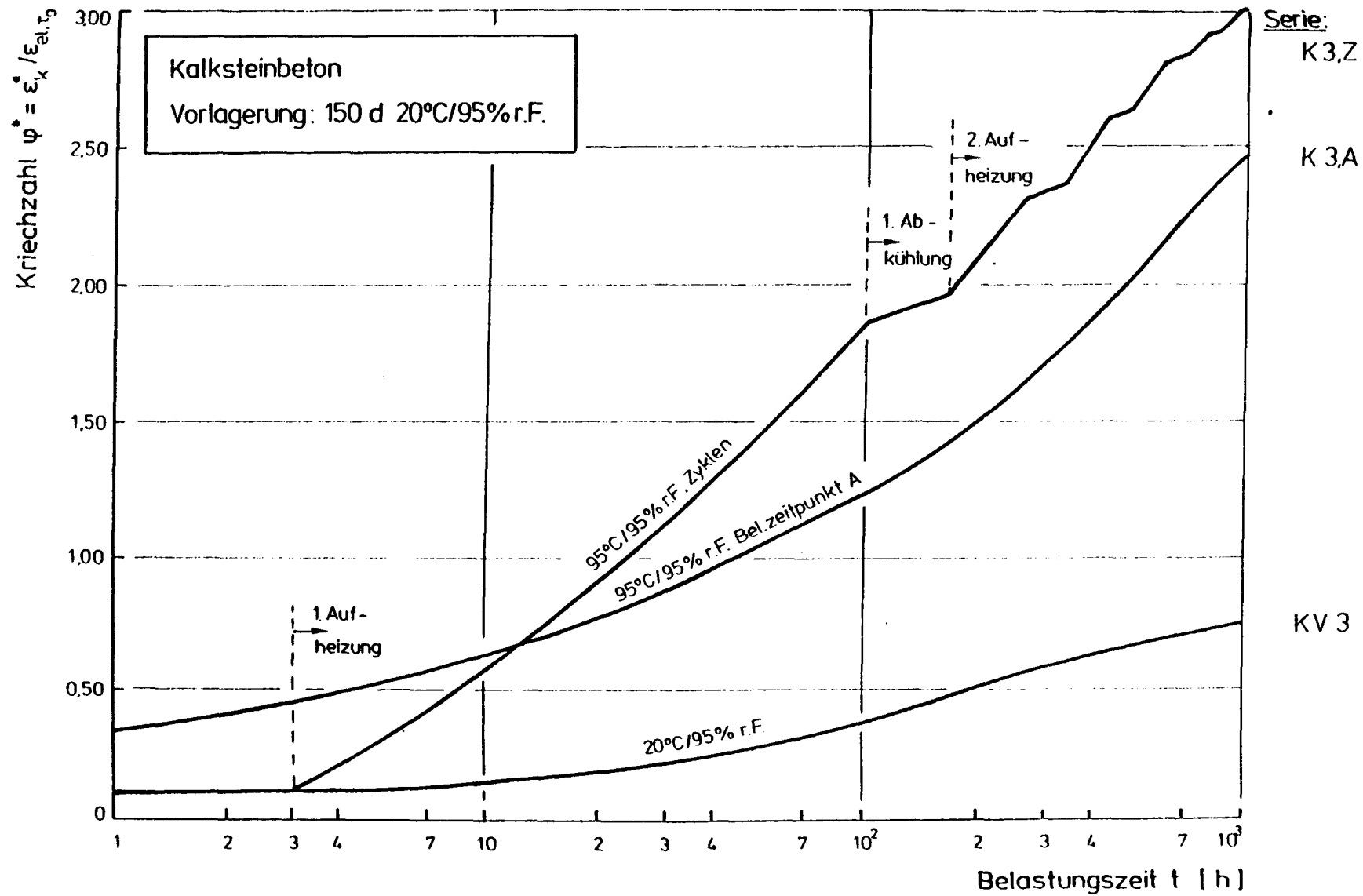


Abb. 66: Zeitliche Entwicklung der Kriechzahl φ^* für Kalksteinbeton bei 95°C/95%r.F. und 20°C/95%r.F.

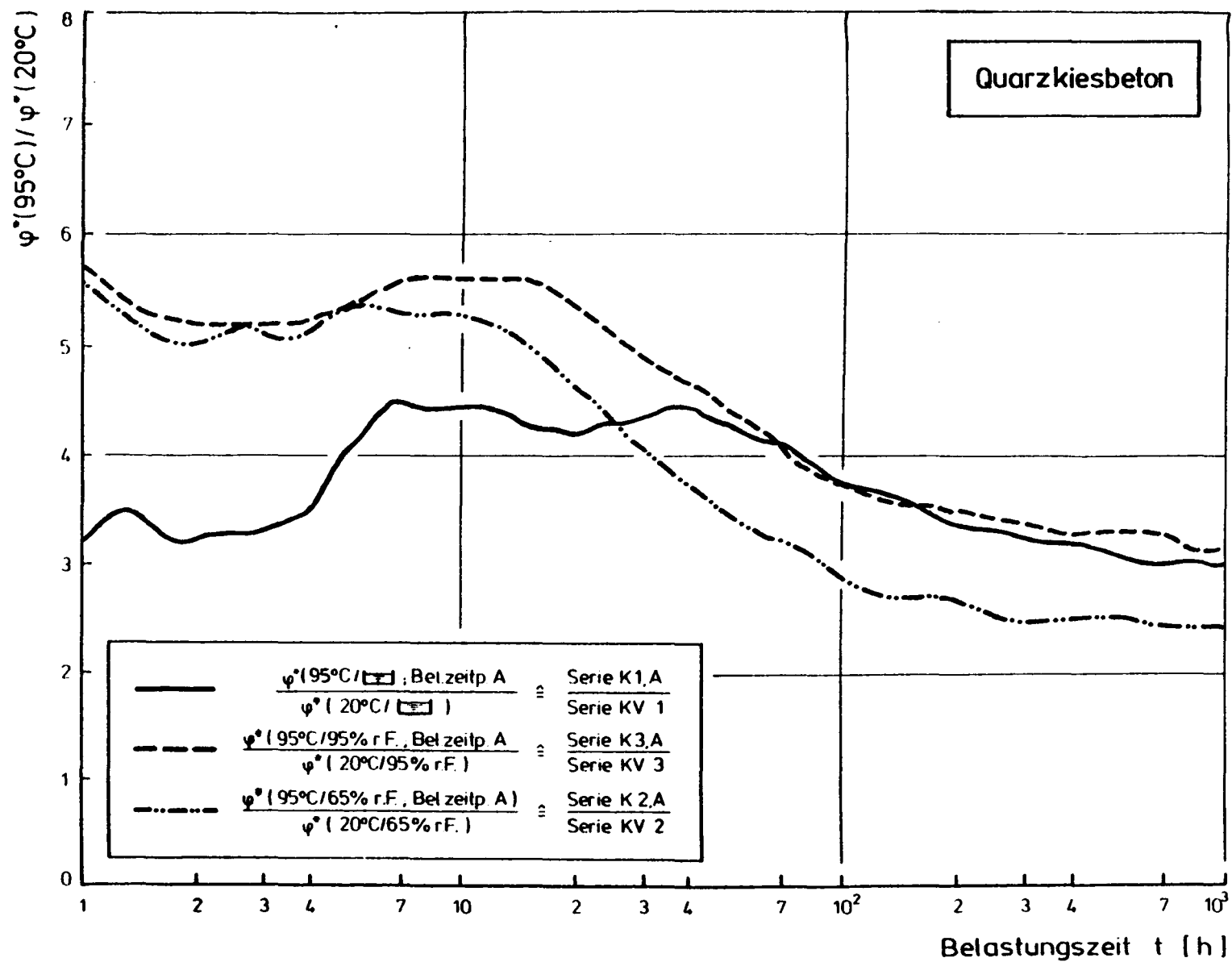


Abb. 67: Verhältnis der Kriechzahl φ^* bei 95°C und 20°C im Belastungszeitraum für Quarkiesbeton

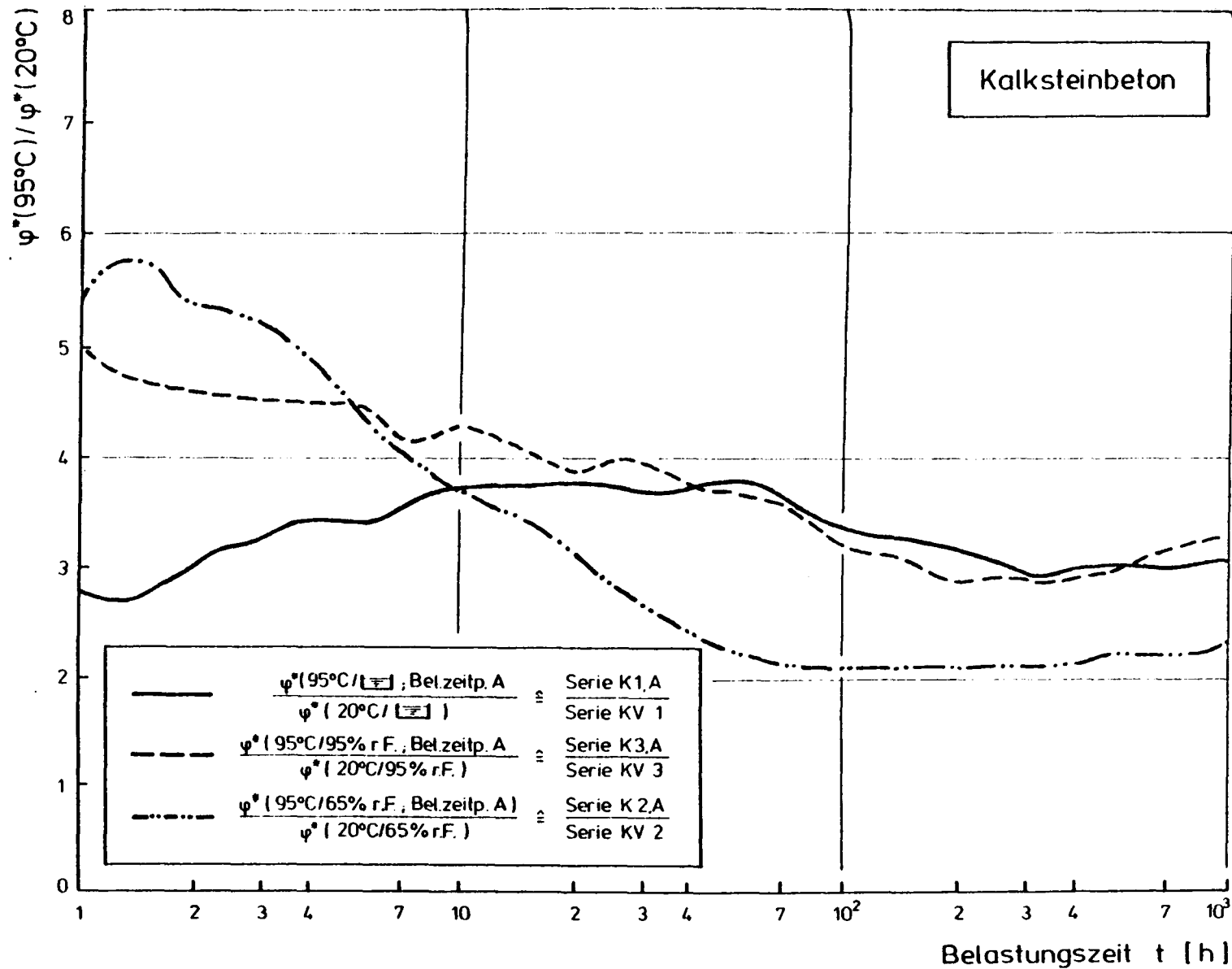


Abb. 68: Verhältnis der Kriechzahl ϕ^* bei 95°C und 20°C im Belastungszeitraum für Kalksteinbeton

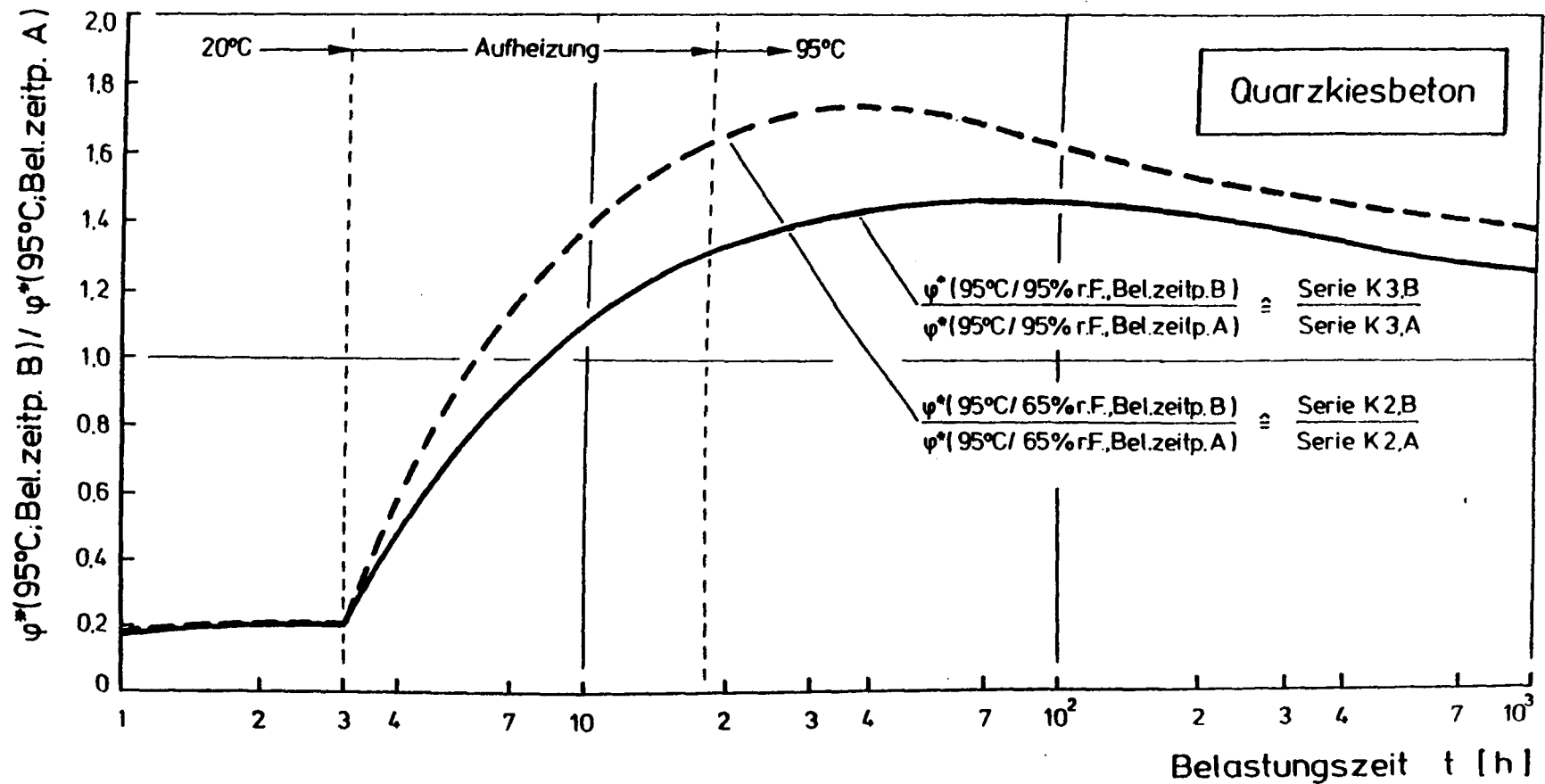


Abb. 69: Verhältnis der Kriechzahl φ^* bei Aufheizung unter Last (Bel.-zeitp. B) und Aufheizung vor der Belastung (Bel.-zeitp. A)

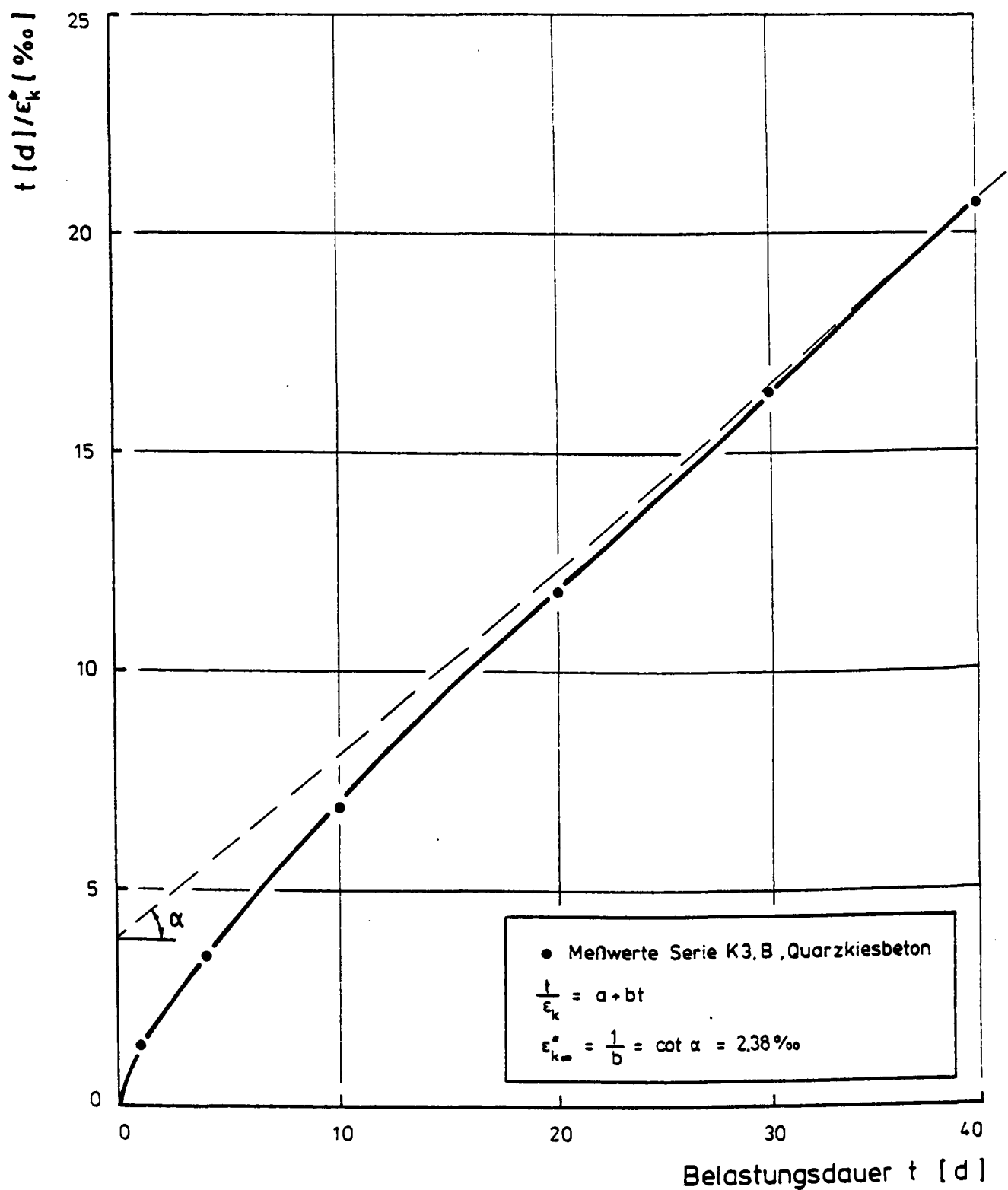


Abb. 70: Beispiel für die Ermittlung der Endkriechdehnung nach Ross (Serie K3,B, Quarzkiesbeton)

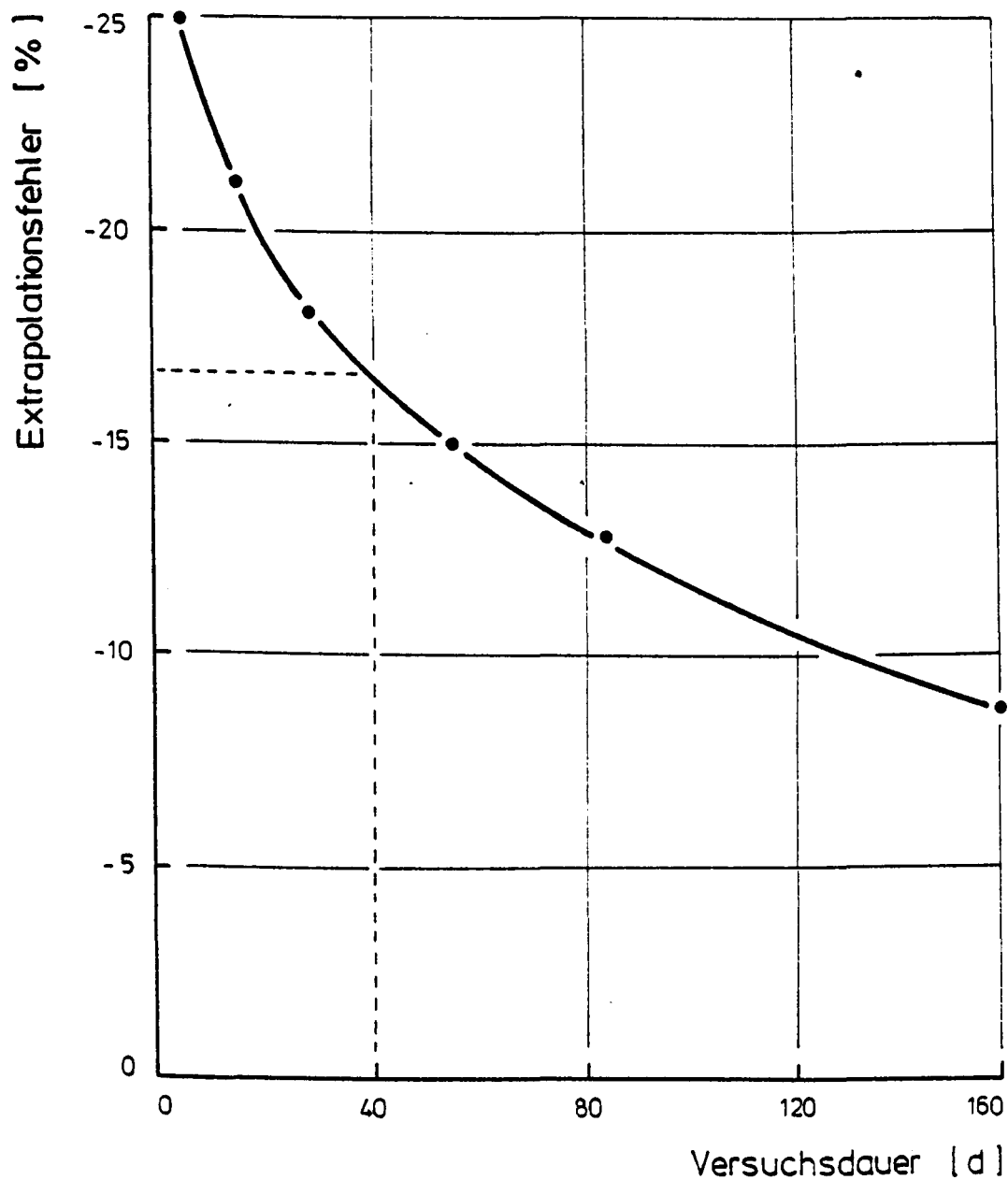


Abb. 71: Fehler bei der Ermittlung der Endkriechdehnung aus Versuchsergebnissen für kurze Belastungszeit; nach [7]

